

RADIAÇÃO E ENERGIA SOLAR

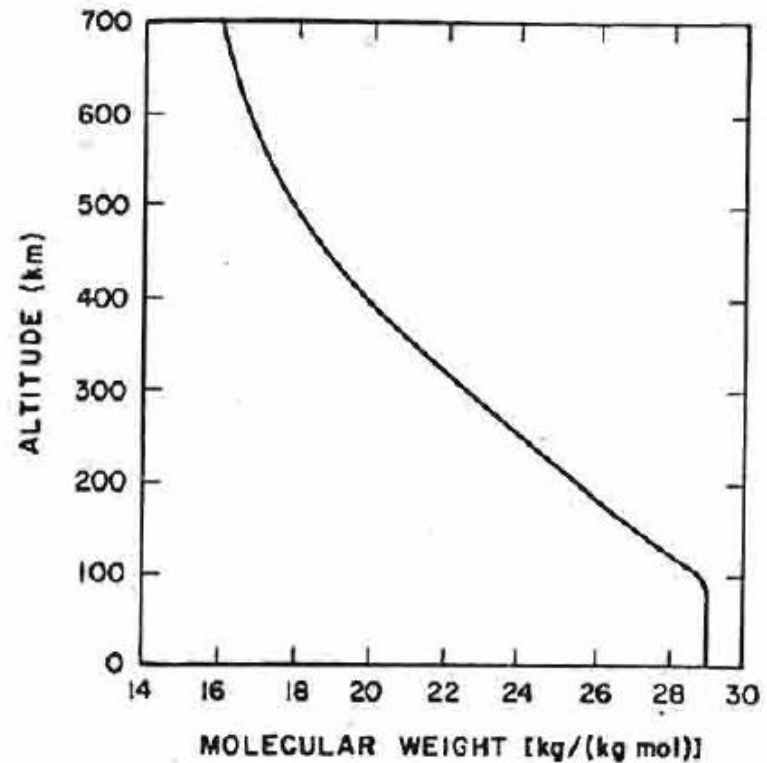
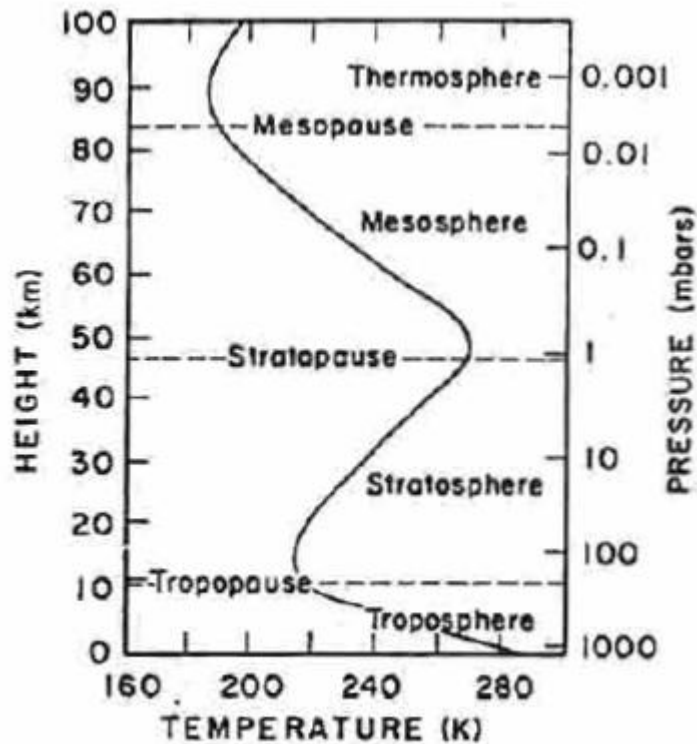
Miguel Centeno Brito

Radiação solar e a atmosfera

Mesmo sem nuvens, a atmosfera atenua a irradiação solar na superfície por dois processos:

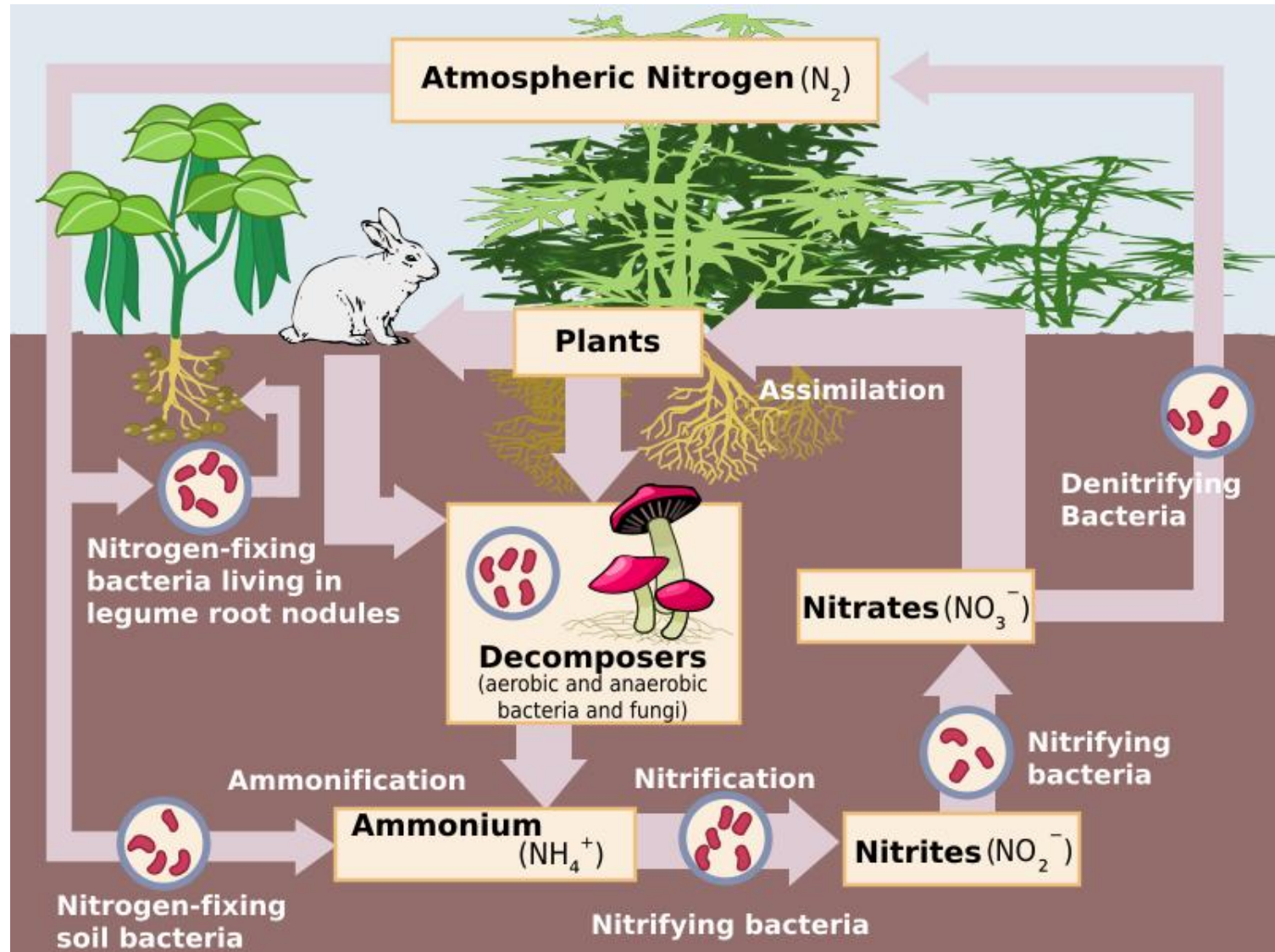
- ❑ **Absorção** de radiação por moléculas presentes na atmosfera, tipicamente transformando a energia radiativa do feixe incidente em energia térmica
- ❑ **Dispersão** de radiação em que a energia incidente é desviada para outras direcções, produzindo radiação difusa.

Constituintes da atmosfera



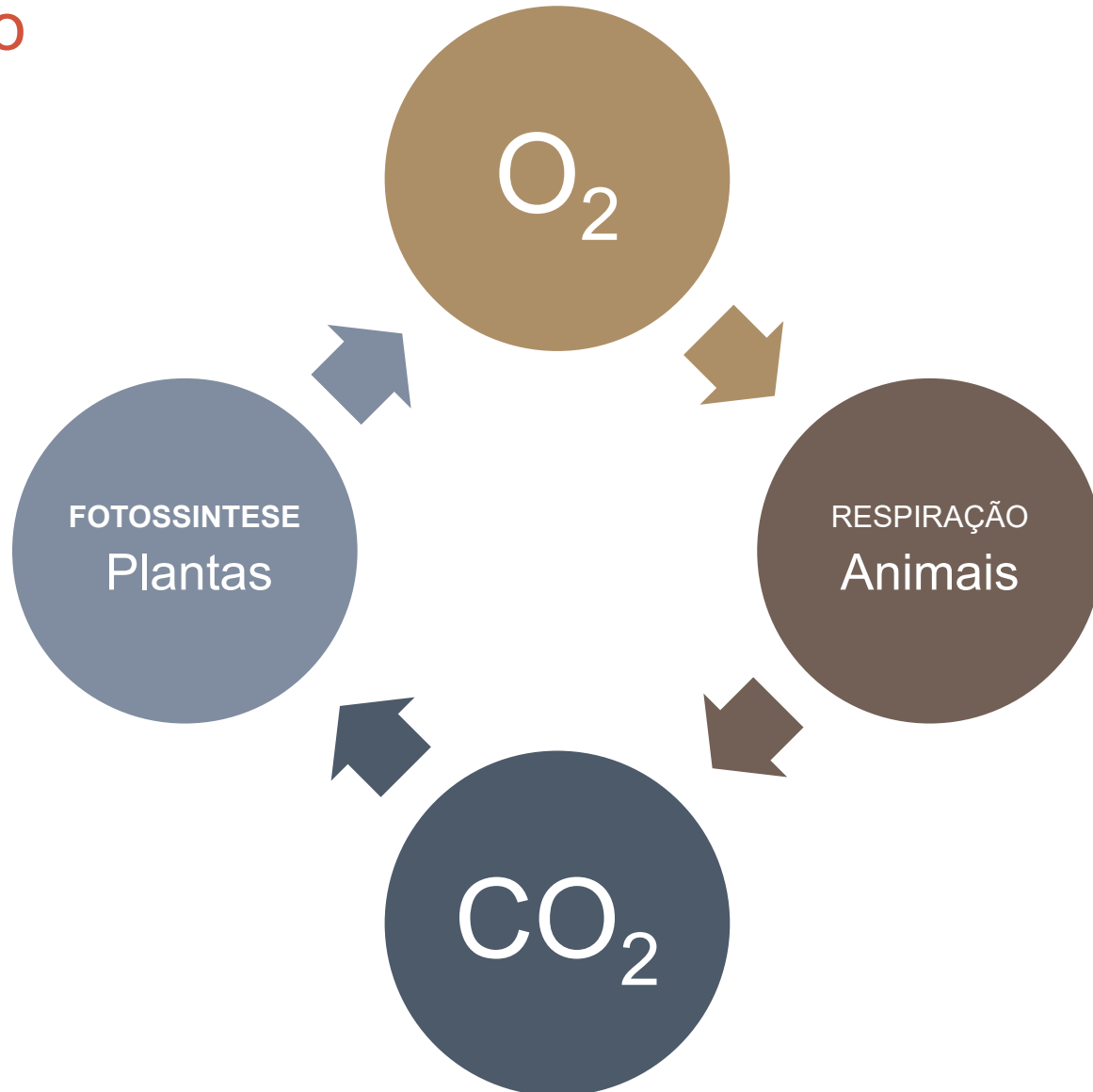
Constituintes da atmosfera

Azoto



Constituintes da atmosfera

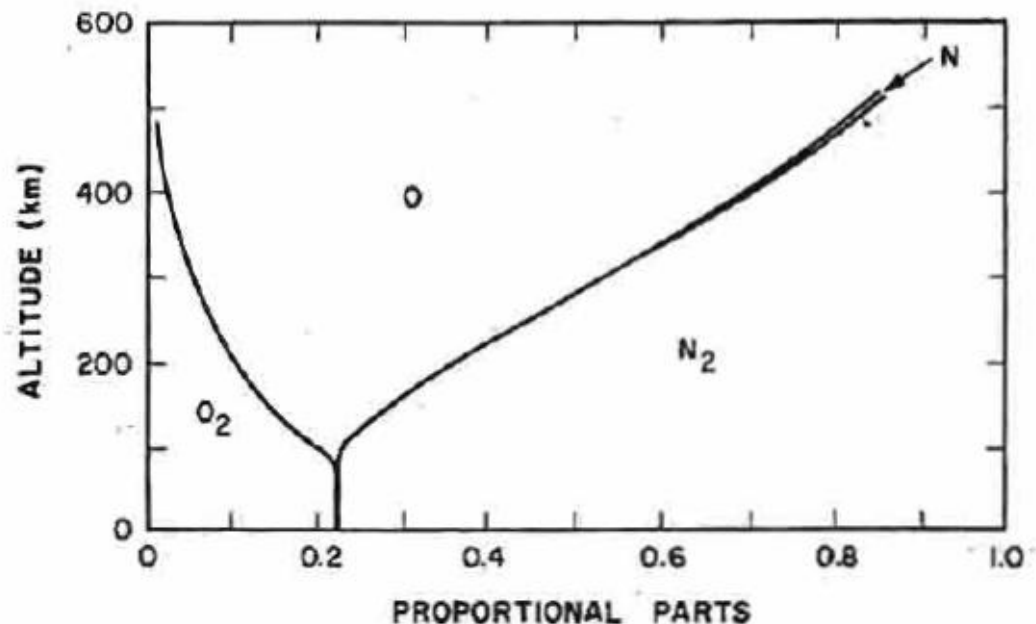
Oxigénio



Constituintes da atmosfera

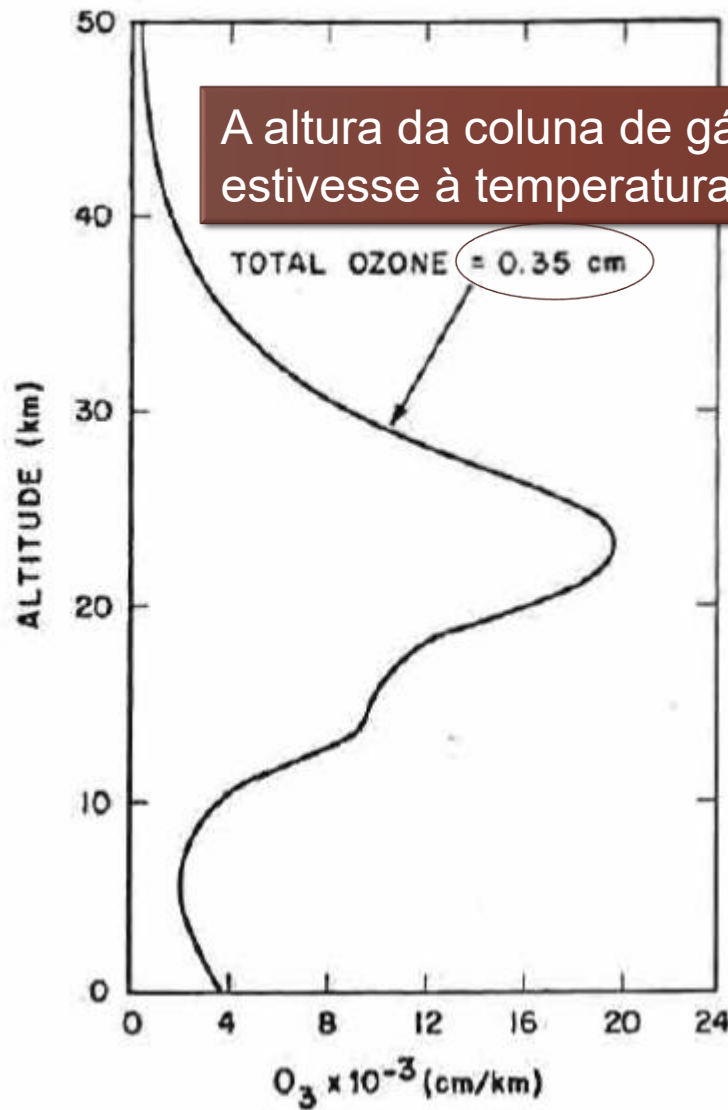
Oxigénio

- ❑ Radiação UV dissocia as moléculas de O_2 acima de 90km de altitude.
- ❑ N_2 é mais difícil de dissociar e por isso N é muito menos comum.
- ❑ Acima de 600km He torna-se o elemento mais comum.



Constituintes da atmosfera

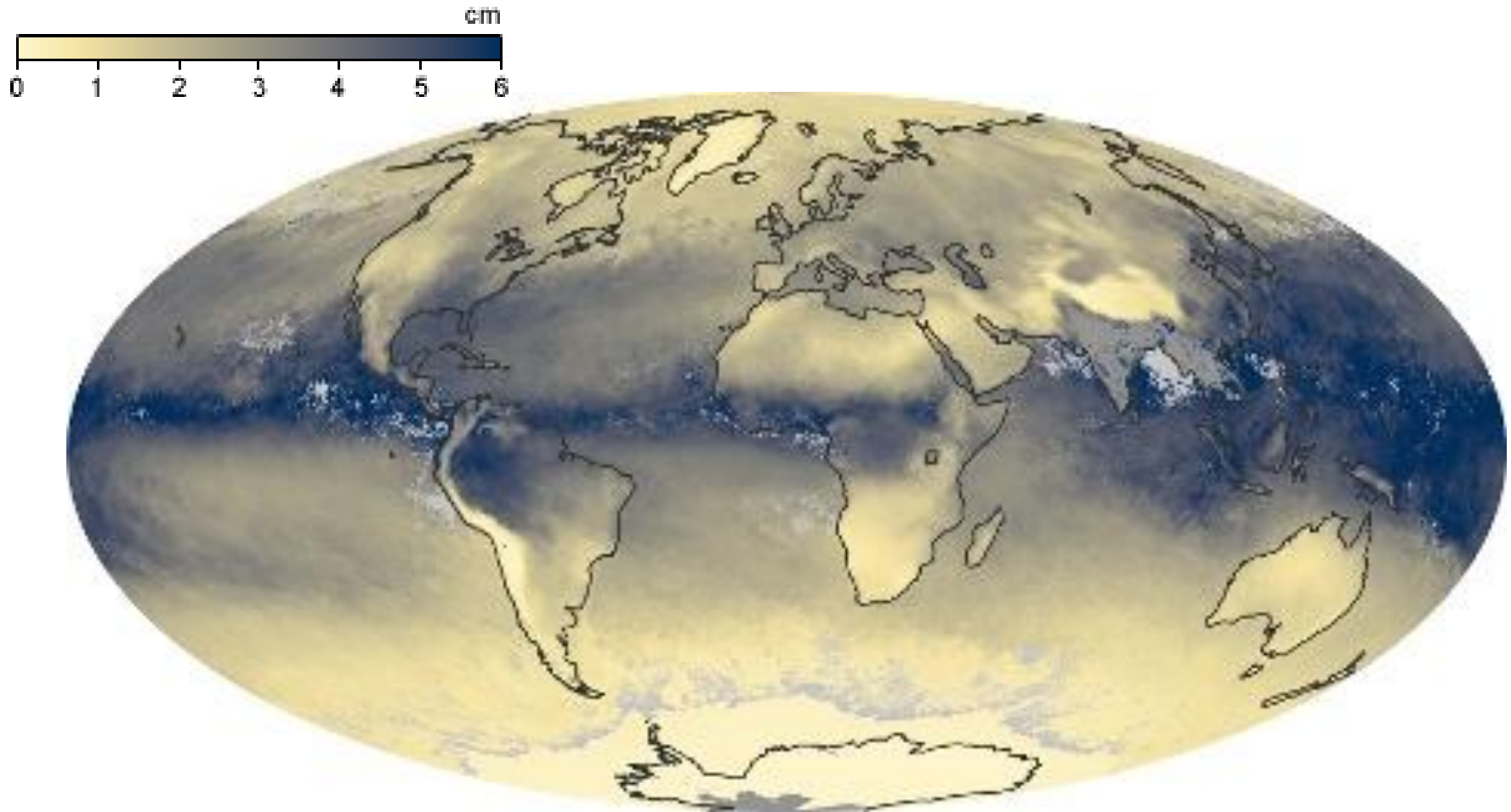
Ozono



O_3 é criado no topo da atmosfera pela radiação UV e, junto à superfície, por decomposição de NO_x de incêndios florestais ou poluição industrial.

Varia fortemente com a latitude e a estação do ano, sendo mais elevado nas regiões polares.

Constituintes da atmosfera



Maior concentração de vapor de água no equador, sobre os oceanos e as florestas tropicais húmidas

Constituintes da atmosfera

‘Funções’ do vapor de água na atmosfera:

- ❑ **Redistribuição** da energia via calor latente
- ❑ Condensação e **precipitação**, fornecendo água doce essencial para a vida
- ❑ **Aquecimento** da atmosfera através do efeito estufa

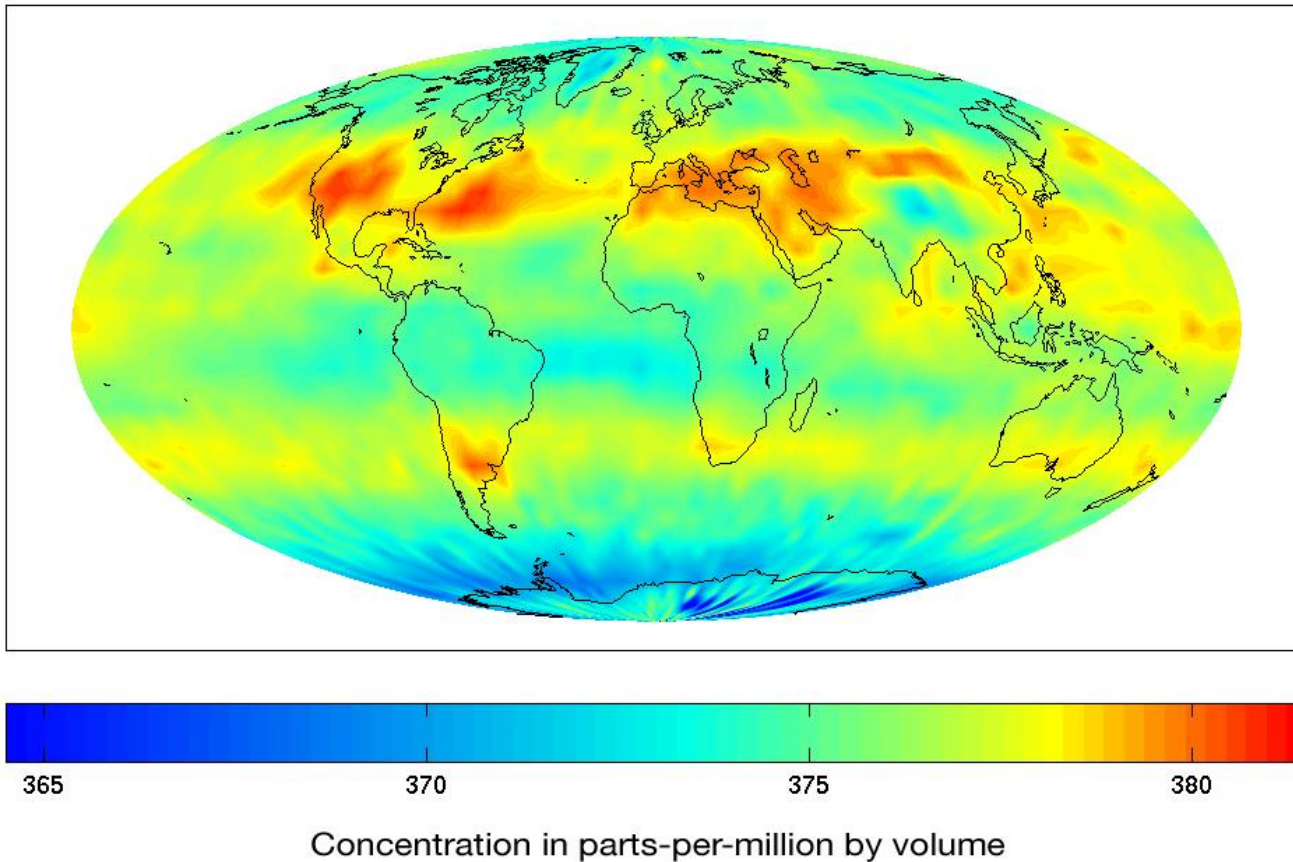
Pode ser apresentado como

- ❑ *Mixing ratio*: a razão de vapor de água relativamente à massa de ar seco para um dado volume
- ❑ *Água precipitável*: a quantidade de vapor de água entre a superfície e o topo da atmosfera, na direcção do zénite (= a altura de água líquida se todo o vapor condensasse à superfície)

Constituintes da atmosfera

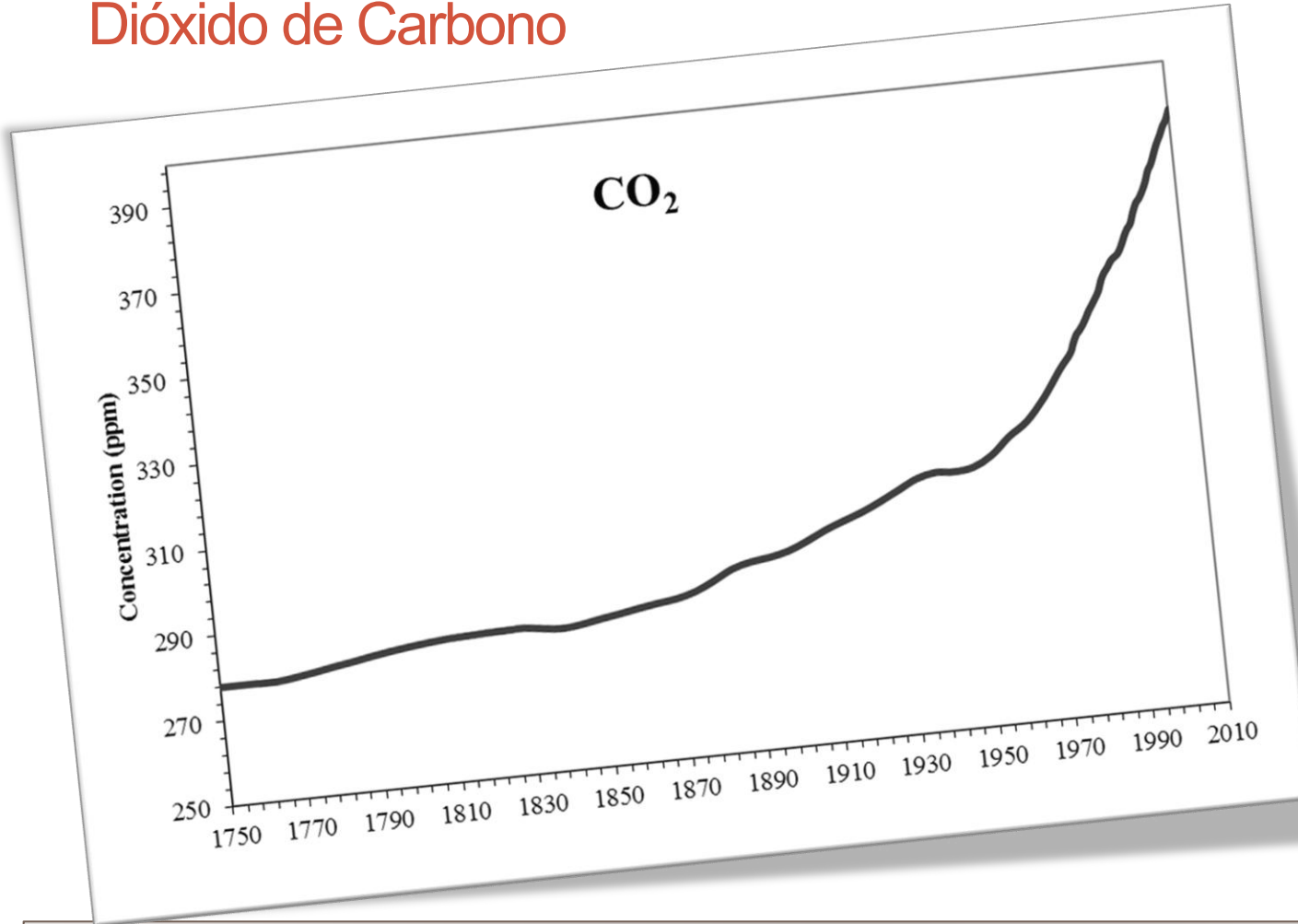
Dióxido de Carbono

NASA AIRS Mid-Tropospheric (8km) Carbon Dioxide
July 2003



Constituintes da atmosfera

Dióxido de Carbono



Principais emissões associadas a emissões industriais (geração de electricidade), transportes e destruição de floresta

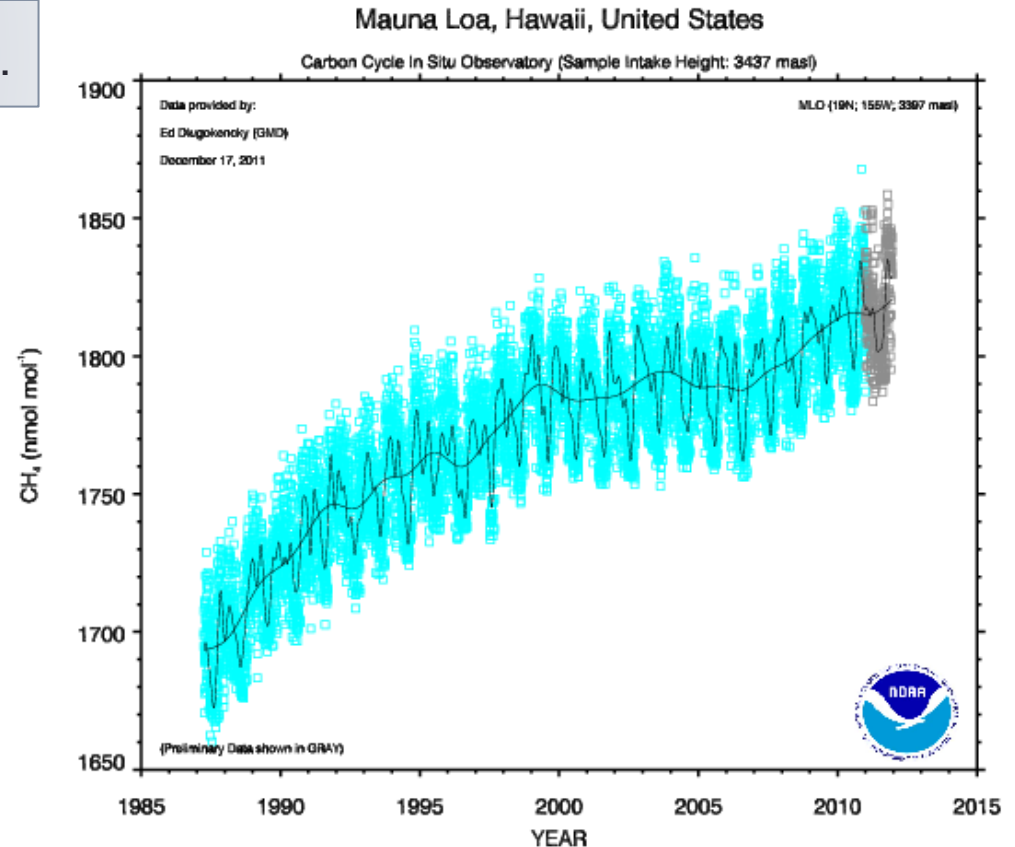
Constituintes da atmosfera

Metano

Importante gás de efeito de estufa.

Principais fontes de emissão:

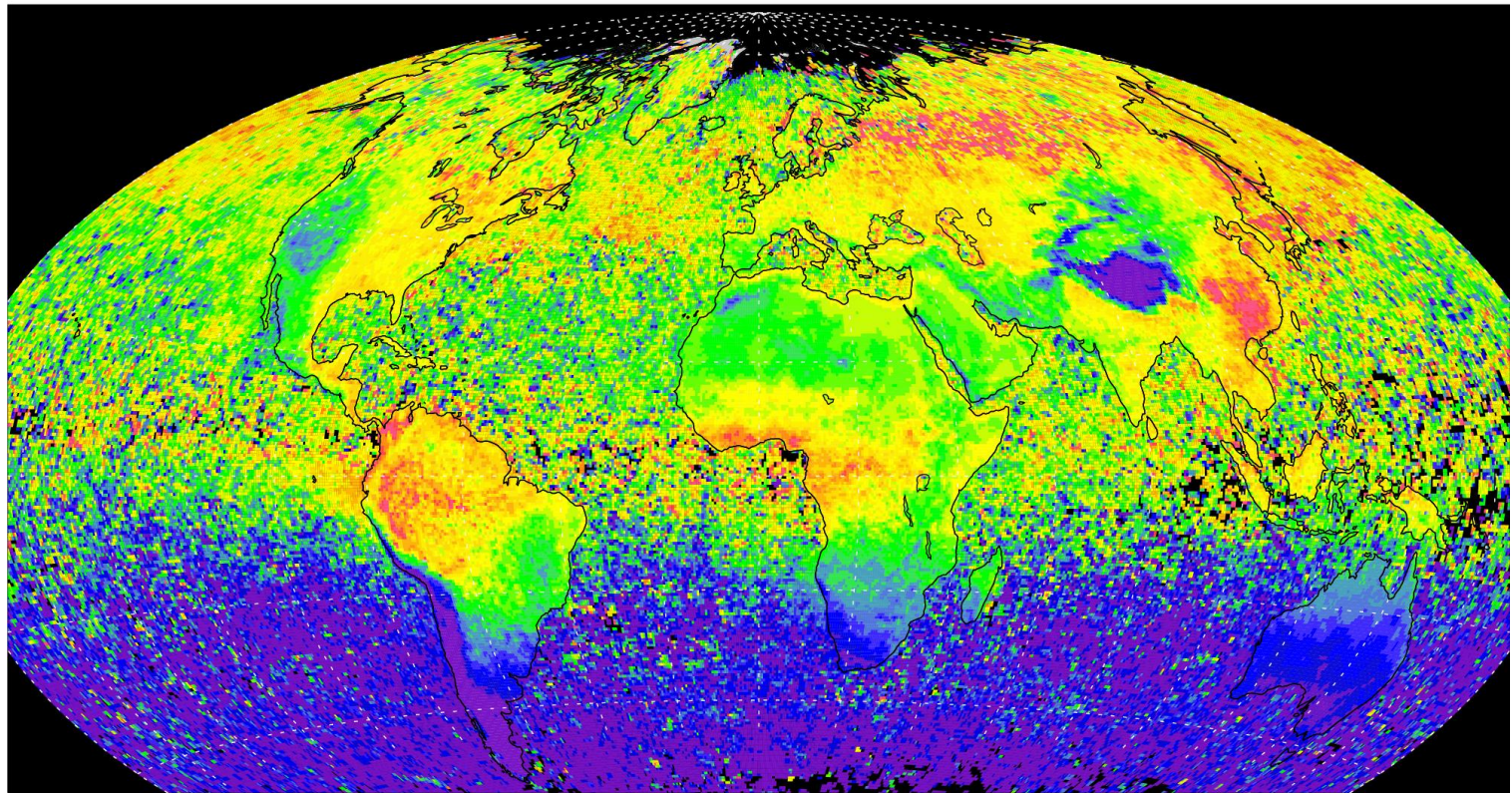
- ☐ Cultivo do arroz (áreas alagadas)
- ☐ Animais domésticos herbívoros (digestão)
- ☐ Mineração de carvão
- ☐ Extracção de gás



Constituintes da atmosfera

Metano

Methane SCIAMACHY/ENVISAT 2003-2005



CH₄ column-averaged mole fraction [ppb]



Constituintes da atmosfera

Aerossóis

Aerossóis são partículas em suspensão na atmosfera.

Principais **fontes naturais**:

- ☐ poeiras do solo
- ☐ erupções vulcânicas
- ☐ spray marinho
- ☐ Incêndios
- ☐ Grãos de pólen



Constituintes da atmosfera

Aerossóis

Aerossóis são partículas em suspensão na atmosfera.

Principais fontes naturais:

- ☐ poeiras do solo
- ☐ erupções vulcânicas
- ☐ spray marinho
- ☐ Incêndios
- ☐ Grãos de pólen

Principais fontes antropogénicas:

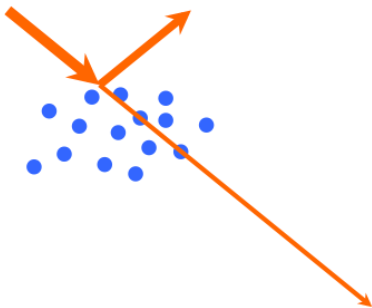
- ☐ Queima de combustíveis fósseis
- ☐ Processos industriais
- ☐ Poeiras ruas pavimentadas, ou não
- ☐ Transportes
- ☐ Queima de biomassa



Constituintes da atmosfera

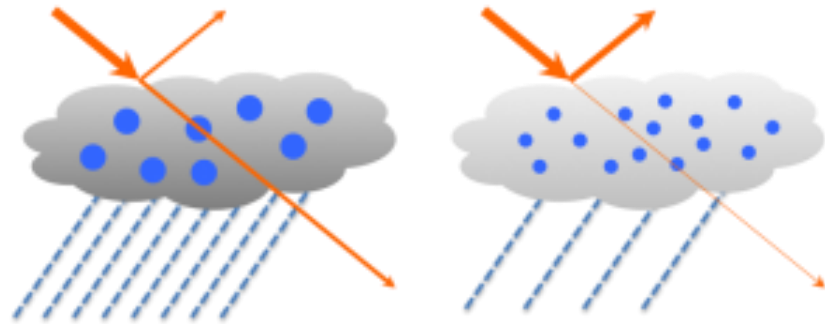
Aerossóis

Aerossóis são partículas em suspensão na atmosfera.



Efeito directo:

Dispersão de radiação solar, produzindo arrefecimento da atmosfera.



Efeito indirecto:

Servem de *semente* para a formação de nuvens, aumentando radiação reflectiva, produzindo ainda mais arrefecimento da atmosfera

Constituintes da atmosfera

Aerossóis

Aerossóis são partículas em suspensão na atmosfera.

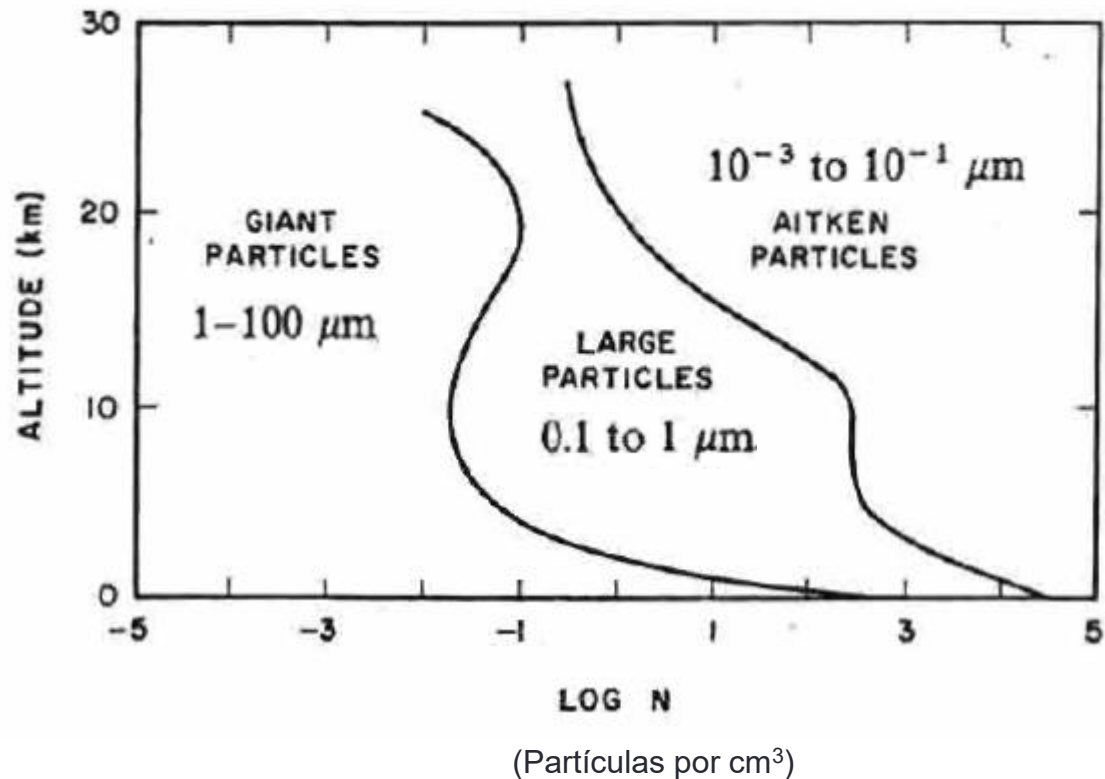
Tempo de residência na atmosfera muito curtos, varia entre alguns dias a uma semana, durante o qual as partículas sofrem *envelhecimento* (coagulação, condensação, evaporação, etc).

Remoção por deposição seca (sedimentação) e húmida (chuva).

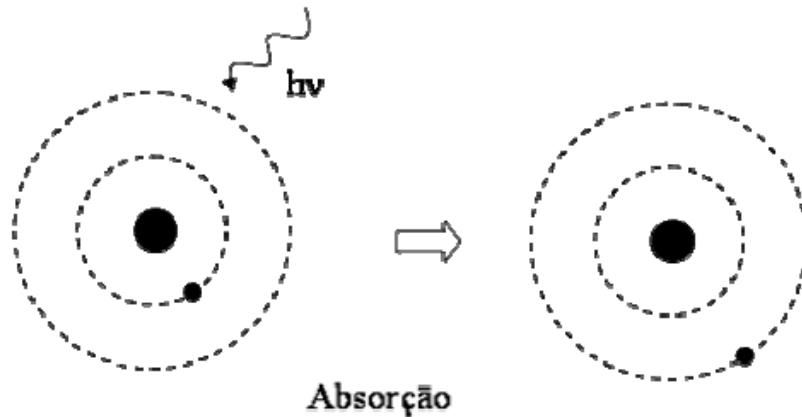
Constituintes da atmosfera

Aerossóis

Tipo e concentração de aerossóis na atmosfera depende fortemente da fonte emissora e das condições meteo locais.



Absorção Molecular

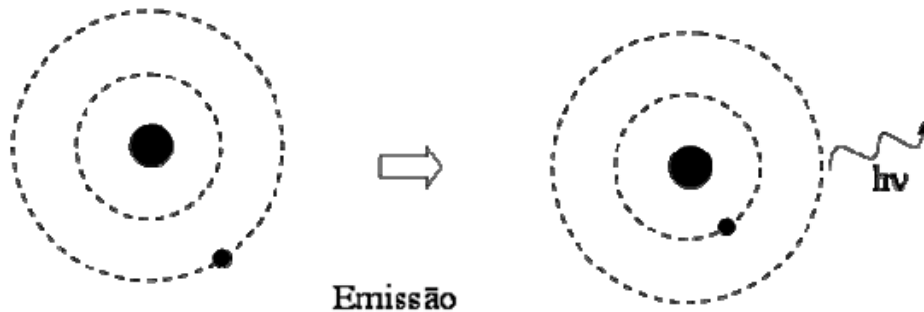


Caso particular de um átomo de hidrogénio:

□ Níveis de energia

$$U_n = -\frac{Rhc}{n^2}$$

□ Energia de emissão/absorção



$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{j^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

Estados de energia quantizados: o electrão sofre transição entre camadas se houver absorção (emissão) de radiação electromagnética de determinado comprimento de onda.

Absorção Molecular

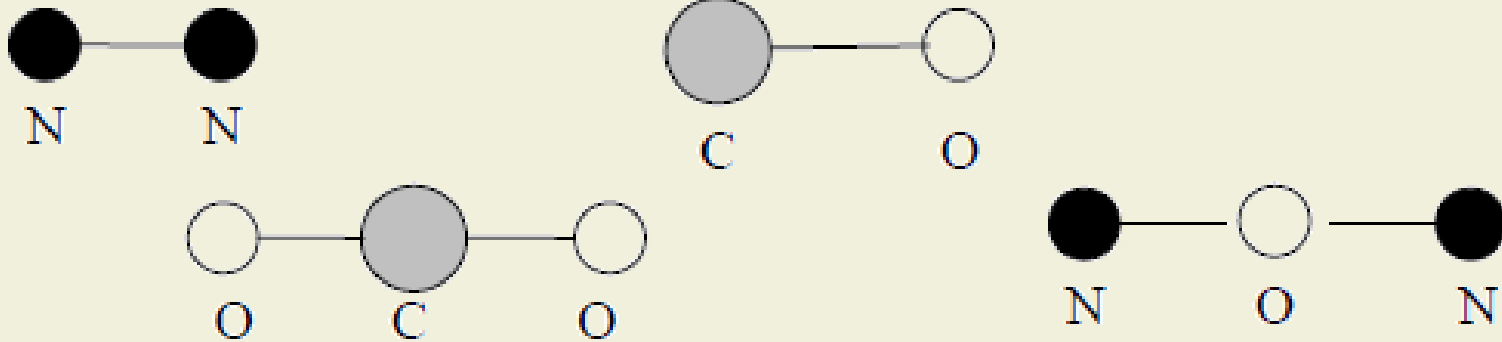
O espectro de absorção molecular é mais complexo do que o de um átomo de hidrogénio.

Podemos ter 3 tipos de espectros, que dependem da **configuração das moléculas**:

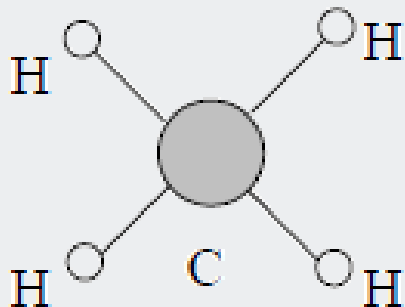
- ☐ Linhas bem definidas de largura finita
- ☐ Séries de linhas – bandas espectrais
- ☐ Espectro contínuo para um intervalo de comprimentos de onda

Absorção Molecular

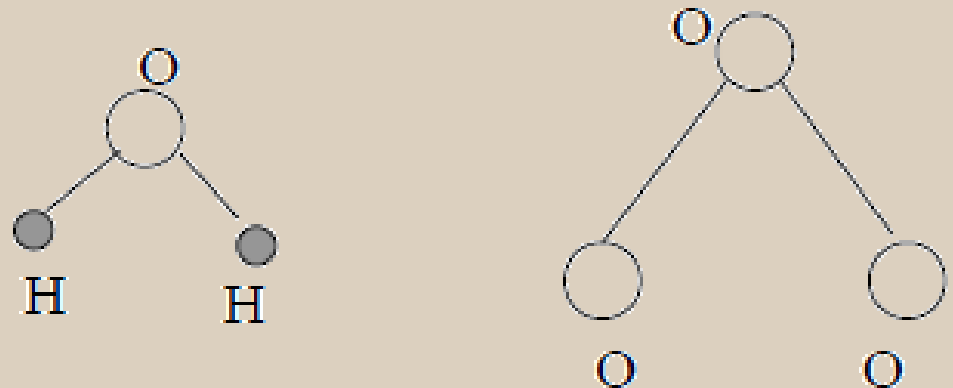
Moléculas lineares



Moléculas com simetria esférica



Moléculas com simetria esférica



Absorção Molecular

Energia total de uma molécula

$$U = U_{\text{rot}} + U_{\text{vib}} + U_{\text{el}} + U_{\text{tr}}$$

$$U_{\text{rot}} < U_{\text{tr}} < U_{\text{vib}} < U_{\text{el}}$$

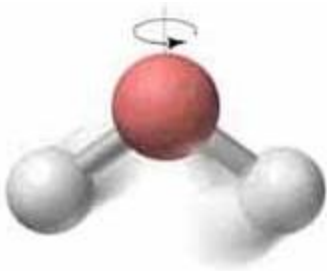
- ☐ Energia cinética de **rotação**
(infravermelho longínquo e microondas)
- ☐ Energia cinética de **vibração**
(infravermelho, até 100 μm)
- ☐ Energia **electrónica**, associada a transição entre níveis
(ultravioleta e visível)
- ☐ Energia cinética de **translação**, por colisões com vizinhos
(infravermelho longínquo e microondas)

Níveis de
energia
quantizados

Absorção Molecular

ENERGIA DE ROTAÇÃO

Só moléculas com **dipolos** (podem ser representadas por uma carga positiva e uma carga negativa) exibem transições radiativas de energia puramente rotacional

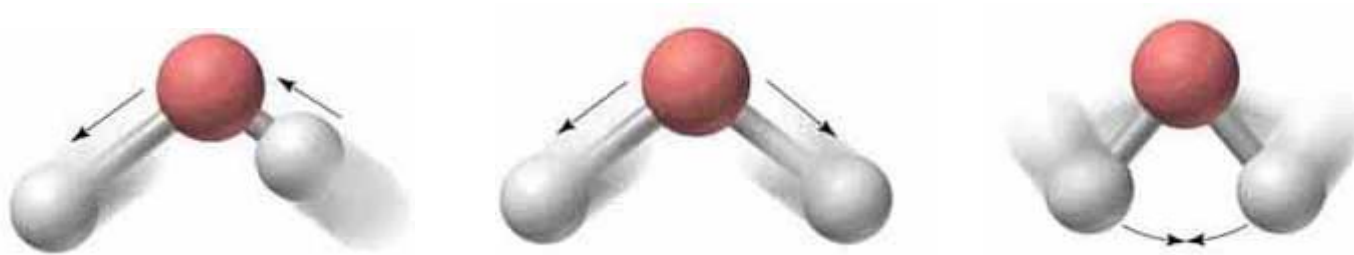


e portanto **moléculas simétricas** (e.g. CO_2) **não apresentam linhas de absorção no infravermelho longínquo**, enquanto moléculas como CO , H_2O e O_3 apresentam espectros rotacionais

Absorção Molecular

ENERGIA DE VIBRAÇÃO

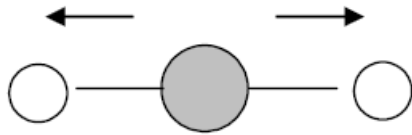
Absorção e emissão associadas à transição de diferentes modos de vibração



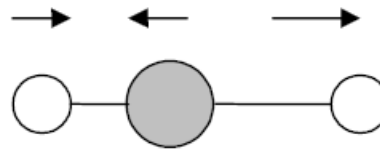
Absorção Molecular

Dipolos induzidos radiativamente (e.g. CO₂)

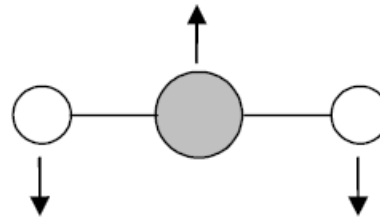
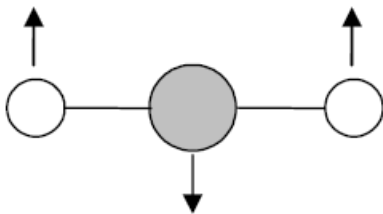
Linhas de
vibração-rotação



Modo simétrico (inativo radiativamente)



Modo assimétrico (ativo radiativamente)



Dois modos em ângulo (possuem a mesma energia)

N₂ e O₂ são moléculas lineares que portanto não apresentam linhas de absorção por vibração nem rotação, e portanto não são activas no infravermelho

Absorção Molecular

Transições electrónicas

- ❑ **Fotoionização**, quando a radiação incidente *arranca* electrões às moléculas
- ❑ **Fotodissociação**, quando há quebra das moléculas ao absorver radiação

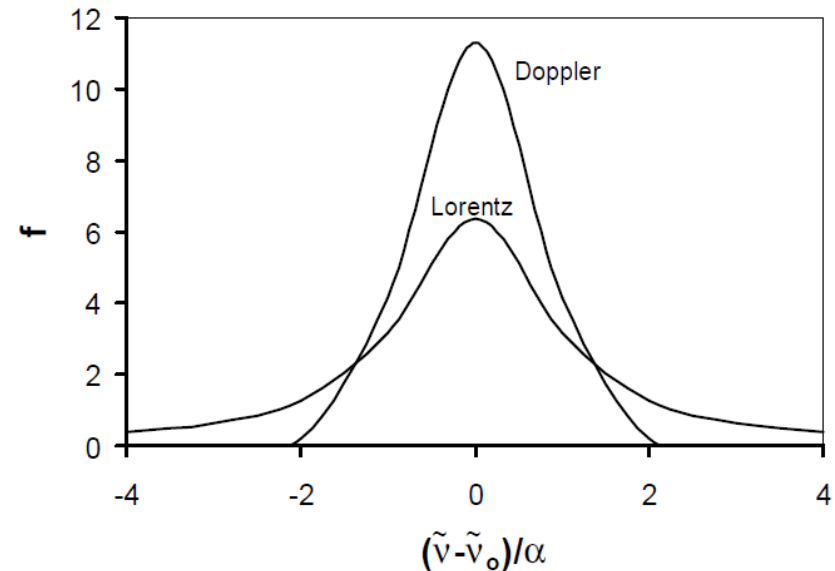
Como as moléculas podem absorver mais energia do que o necessário para o processo (o excesso pode ser dissipado via energia térmica dos seus constituintes) o **espectro das transições electrónicas é contínuo** e não discreto

Absorção Molecular

Forma das linhas espectrais

A forma das linhas espectrais pode ser caracterizada por

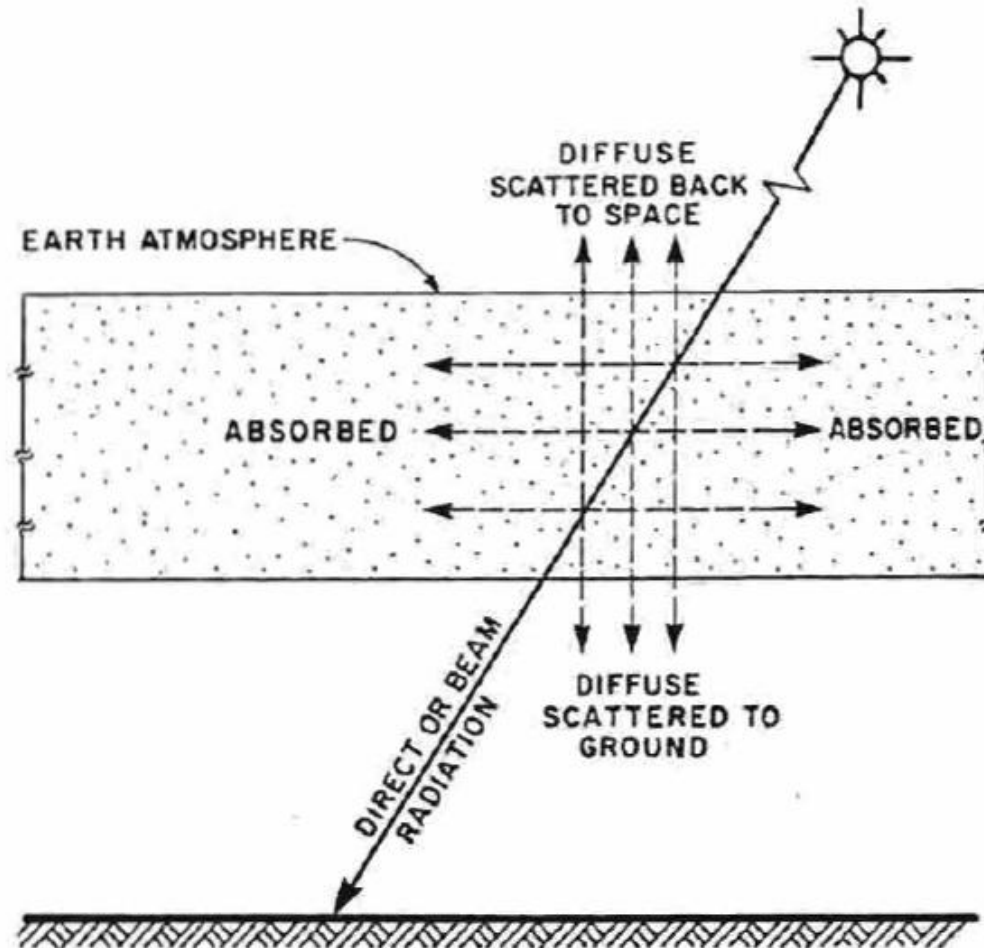
- ❑ Posição **central** da linha
- ❑ **Intensidade** da linha
- ❑ Factor de **forma**



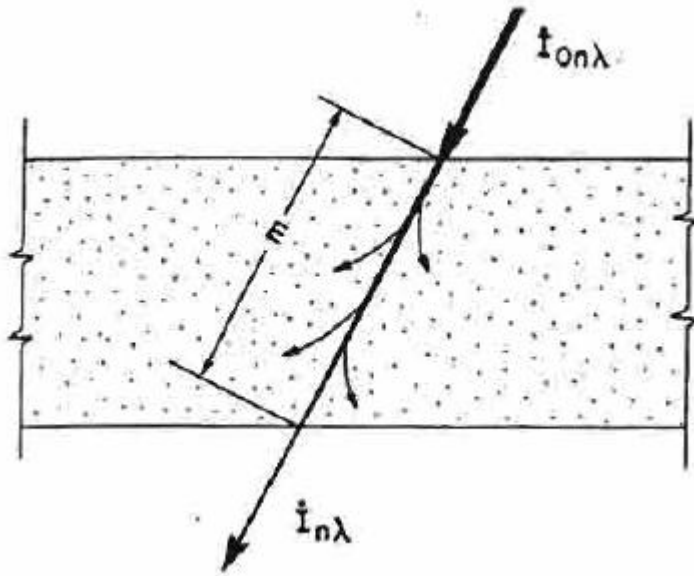
O alargamento das linhas espectrais é devido a

- ❑ Efeito do **princípio de incerteza** de Heisenberg (normalmente desprezável)
- ❑ **Efeito de Lorentz**: Colisão entre moléculas, ou **alargamento por pressão** (transferência de energia de translação, relevante para a baixa atmosfera)
- ❑ **Efeito de Doppler**, devido a distribuição de **velocidades**, relevante entre os 20 e 50km

Atenuação da radiação directa



Atenuação da radiação directa



Assumindo uma atmosfera homogénea

Lei de Beer
(ou de Lambert, ou de Bouguer)

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} \exp(-k_{\lambda}m)$$

k_{λ} é **coeficiente de atenuação** ou **extinção**
 m é comprimento de **percurso óptico**
 $k_{\lambda}m$ é a **espessura óptica**

Porque se tratam de processos independentes:

$$k_{\lambda}m = \sum_{i=1}^{i=j} k_{i\lambda}m_i$$

Atenuação da radiação directa

Define-se **coeficiente de transmissão da atmosfera**, ou transmitância, como a razão da radiação que atravessa a atmosfera e a radiação incidente.

Para processos de atenuação independentes:

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{n\lambda}}{I_{0n\lambda}} = \prod_{i=1}^{i=j} \tau_{i\lambda}$$

Para cada processo temos

$$\tau_{i\lambda} = \exp(-k_{i\lambda}m_i)$$

Notar que na realidade seria mais rigoroso considerar um conjunto de camadas de atmosfera diferentes e determinar a transmitância de cada uma das camadas.

Atenuação da radiação directa

A irradiância normal à superfície, medida ao nível do mar, somada para todos os comprimentos de onda, é portanto

$$I_n = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \sum_{\lambda=0}^{\infty} I_{n\lambda} \Delta\lambda$$

ou

$$I_n = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \sum_{\lambda=0}^{\infty} \left(I_{0n\lambda} \prod_{i=1}^{i=j} \tau_{i\lambda} \right) \Delta\lambda$$

Dispersão na atmosfera

Dispersão é a alteração da direcção de propagação de um fotão sem que ocorra troca de energia com a atmosfera, havendo portanto produção de radiação difusa.

O **regime de dispersão** depende da relação entre o comprimento de onda (λ) da radiação incidente e o diâmetro das partículas intervenientes (D):

❑ Óptica **geométrica**, quando $\lambda \ll D$

Exemplo: refacção de luz visível ($1\mu\text{m}$) por gotas de água (1mm)

❑ Dispersão de **Rayleigh**, quando $\lambda \gg D$

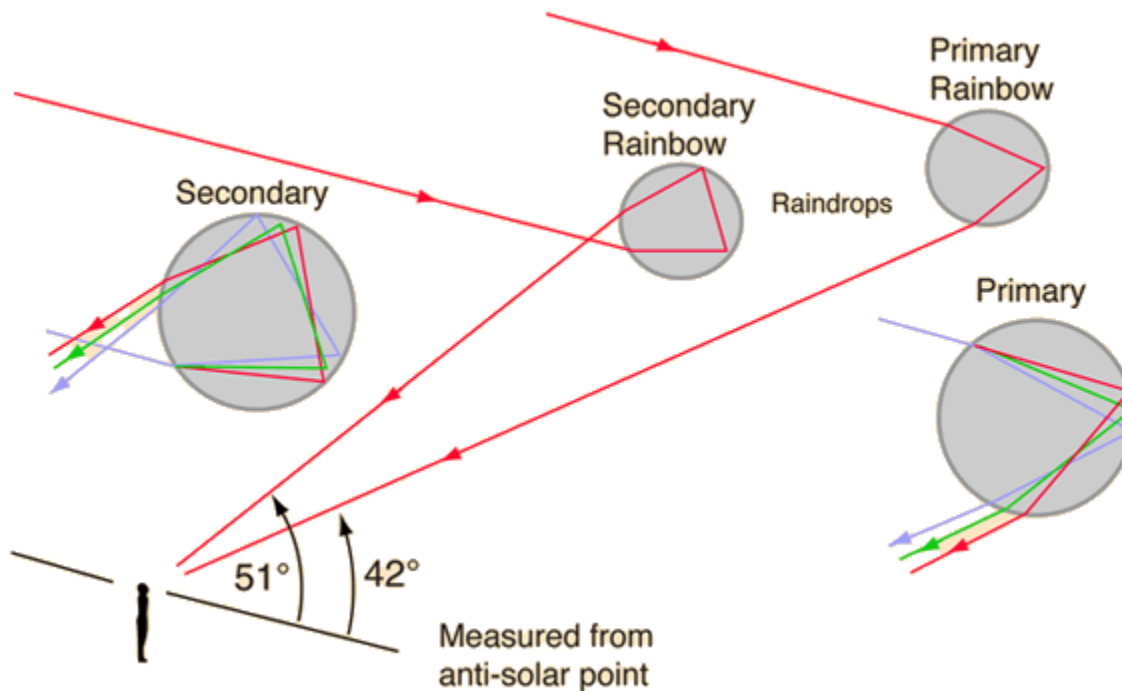
Exemplo: dispersão de luz visível ($1\mu\text{m}$) por moléculas de ar (1nm)

❑ Dispersão de **Mie**, quando $\lambda \sim D$

Exemplo: dispersão de luz visível ($1\mu\text{m}$) por gotículas nas nuvens ($1\mu\text{m}$)

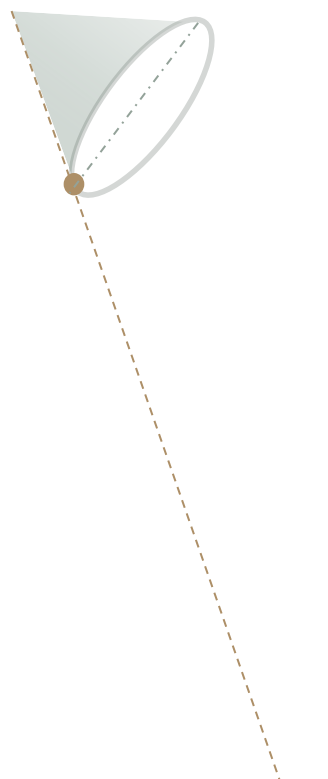
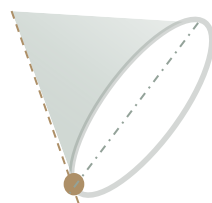
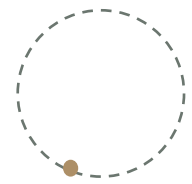
Dispersão óptica

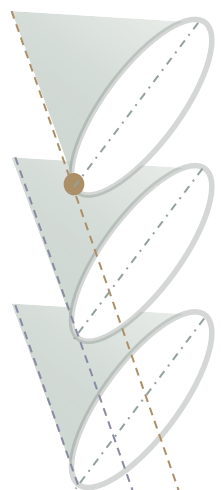
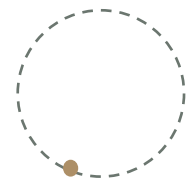
Efeito peculiar de refração da radiação solar em gotas de água.

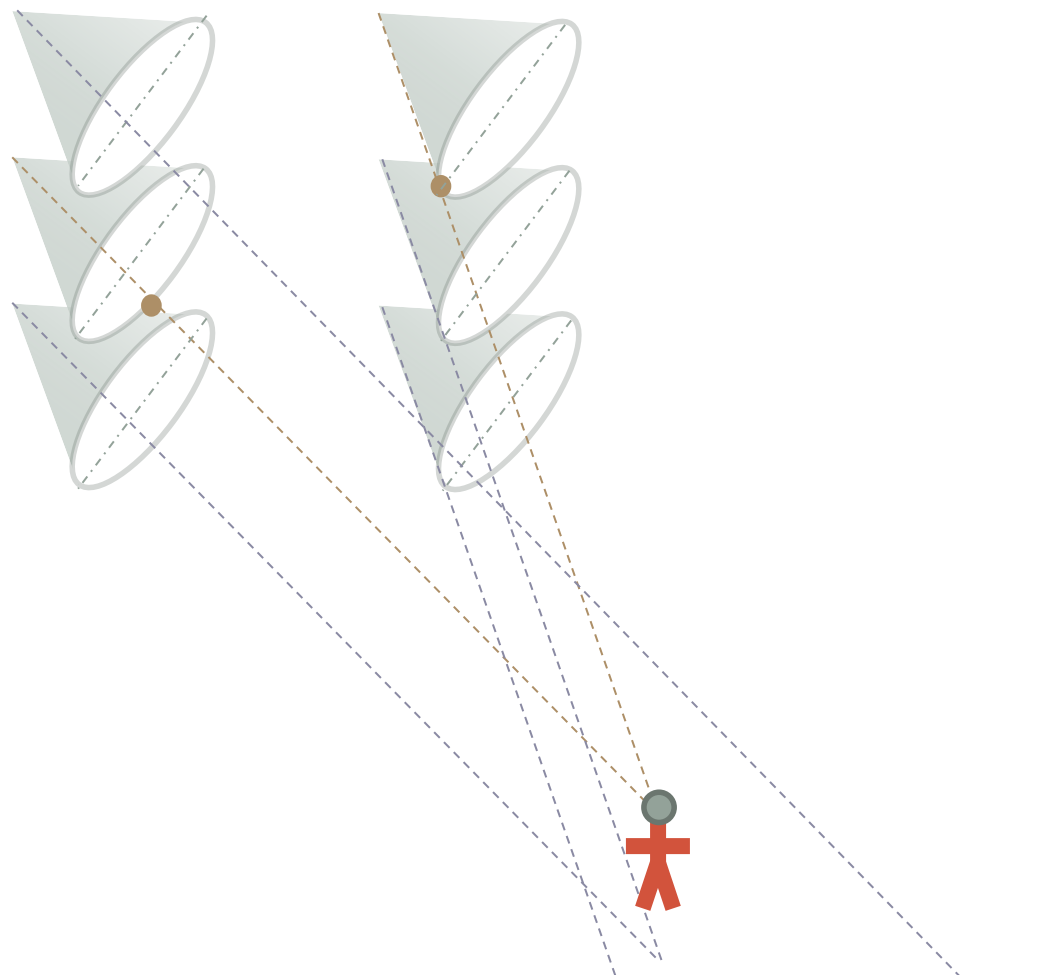


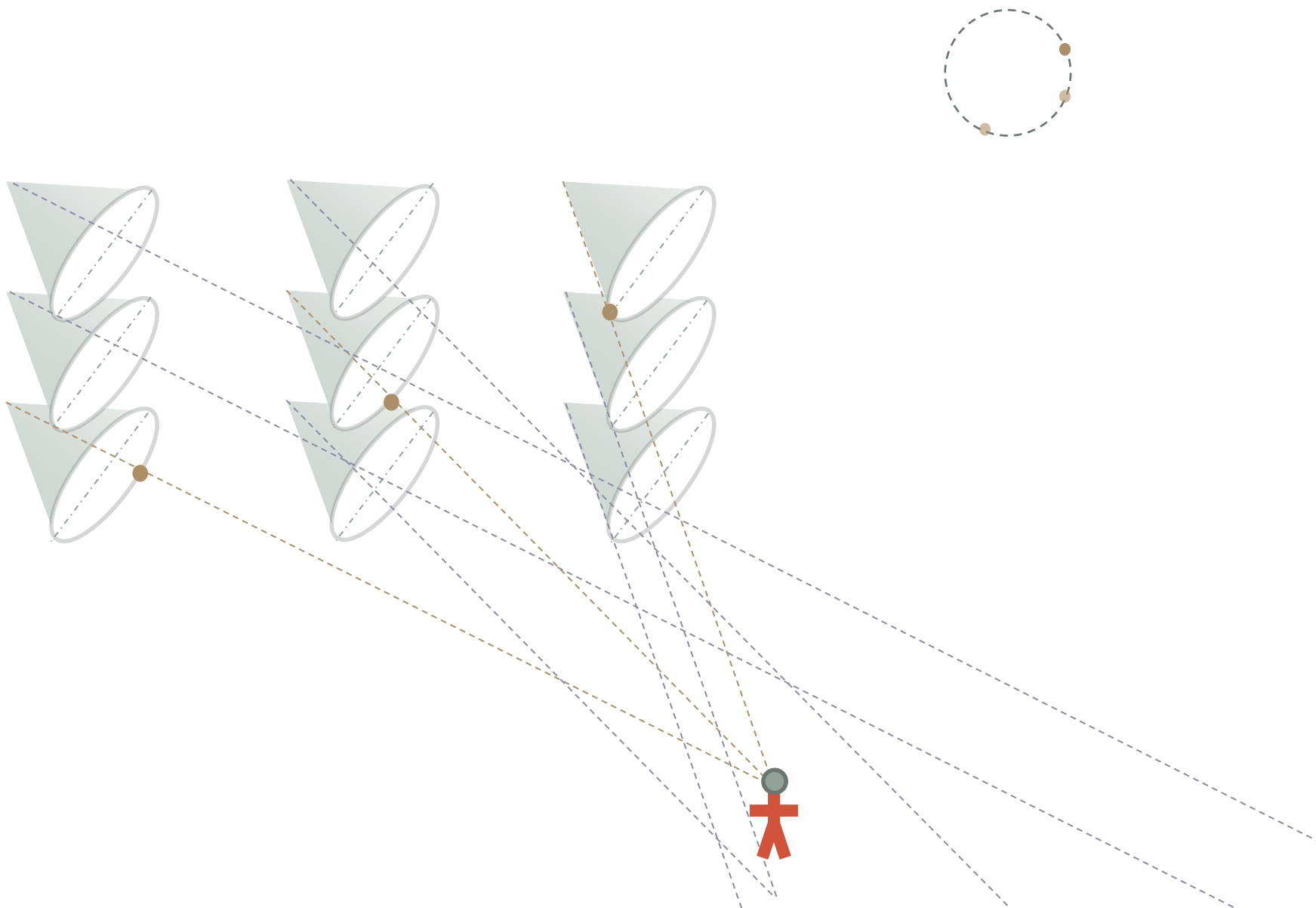
Porque razão o arco-íris é um arco?











Skydivers spot 'unique' circular rainbow



<https://www.bbc.com/news/videos/cd72rdplr2qo>

Dispersão de Rayleigh

ON THE TRANSMISSION OF LIGHT THROUGH AN ATMOSPHERE CONTAINING SMALL PARTICLES IN SUSPENSION, AND ON THE ORIGIN OF THE BLUE OF THE SKY.

[*Philosophical Magazine*, XLVII. pp. 375—384, 1899.]

THIS subject has been treated in papers published many years ago*. I resume it in order to examine more closely than hitherto the attenuation undergone by the primary light on its passage through a medium containing small particles, as dependent upon the number and size of the particles. Closely connected with this is the interesting question whether the light from the sky can be explained by diffraction from the molecules of air themselves, or whether it is necessary to appeal to suspended particles composed of foreign matter, solid or liquid. It will appear, I think, that even in the absence of foreign particles we should still have a blue sky†.

The calculations of the present paper are not needed in order to explain the general character of the effects produced. In the earliest of those above

* *Phil. Mag.* xli. pp. 107, 274, 447 (1871); xlii. p. 81 (1881). [Vol. i. pp. 87, 104, 518.]

† My attention was specially directed to this question a long while ago by Maxwell in a letter which I may be pardoned for reproducing here. Under date Aug. 28, 1873, he wrote:—
“I have left your papers on the light of the sky, &c. at Cambridge, and it would take me, even if I had them, some time to get them assimilated sufficiently to answer the following question, which I think will involve less expense to the energy of the race if you stick the data into your formula and send me the result....

“Suppose that there are N spheres of density ρ and diameter s in unit of volume of the medium. Find the index of refraction of the compound medium and the coefficient of extinction of light passing through it.

“The object of the enquiry is, of course, to obtain data about the size of the molecules of air. Perhaps it may lead also to data involving the density of the æther. The following quantities are known, being combinations of the three unknowns,

M = mass of molecule of hydrogen ;

N = number of molecules of any gas in a cubic centimetre at 0° C. and 760 B.

s = diameter of molecule in any gas :—

Dispersão de Rayleigh

Hipóteses:

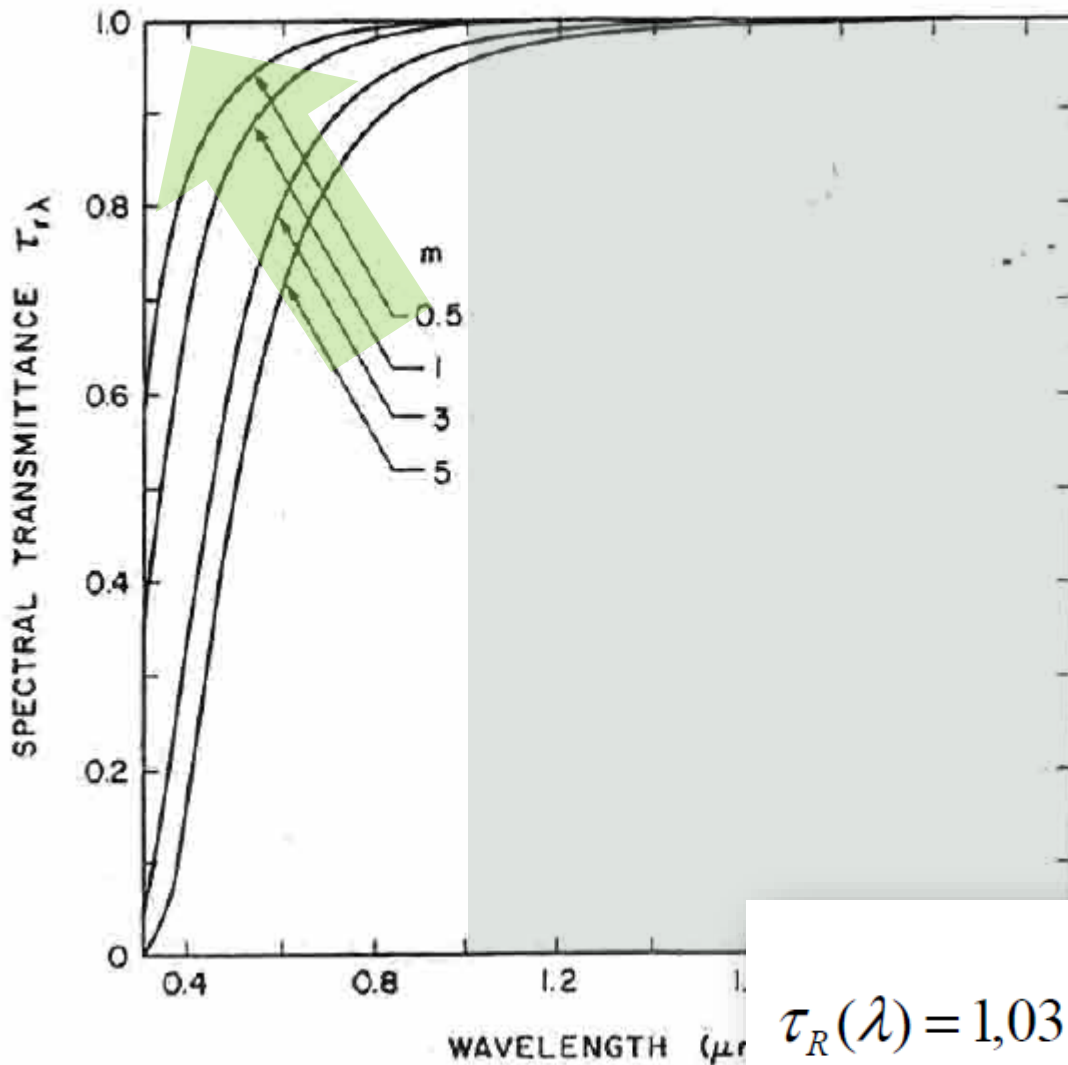
- ❑ As partículas são esféricas
- ❑ A dispersão por cada partícula é um processo independente
- ❑ Partículas com diâmetros muito menores do que o comprimento de onda da radiação incidente

$$\frac{I_{\theta}}{I_0} = \frac{1}{2r^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 D^6 N_p (1 + \cos^2 \theta)$$

Diagram illustrating the components of the Rayleigh scattering equation:

- $\frac{1}{2r^2}$ points to **distância** (distance)
- $\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4$ points to **comprimento de onda** (wavelength)
- $\left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2$ points to **constantes ópticas** (optical constants)
- D^6 points to **dimensão das partículas** (particle size)
- N_p points to **concentração** (concentration)
- $(1 + \cos^2 \theta)$ points to **polarização** (polarization)

Dispersão de Rayleigh



$$\tau_{r,\lambda} = \exp(-0.008735\lambda^{-4.08}m_a)$$

A transmitância depende linearmente da espessura da atmosfera, ou da *massa de ar* que tem valores

$$m_a < 1$$

para locais acima do nível do mar e

$$m_a \rightarrow 0$$

no topo da atmosfera.

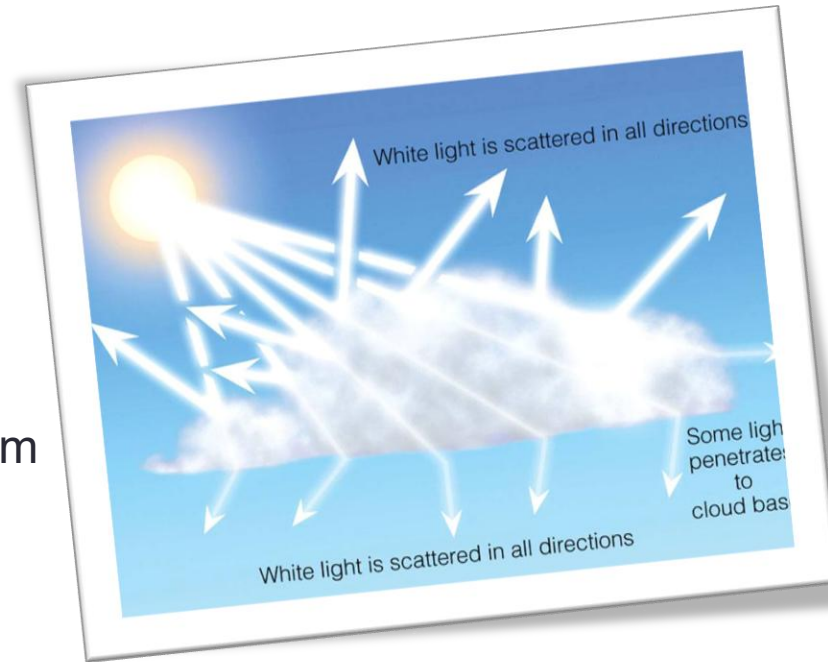
$$\tau_R(\lambda) = 1,031 \times 0,00838 \lambda^{-\left(3,916 + 0,074\lambda + \frac{0,050}{\lambda}\right)}$$

Porque razão o céu não é violeta?



Dispersão de Mie

Particularmente relevante para descrever dispersão por aerossóis e gotas de nuvens. A dispersão é caracterizada pela formação de um lóbulo frontal



Para o caso das nuvens:

$$k_{ws\lambda} = 0.008635\lambda^{-2}$$

E para o caso de aerossóis:

$$k_{d\lambda} = 0.08128\lambda^{-0.75}$$



Dispersão de Mie

Podemos descrever todos os efeitos de equação da **turbidez**

$$k_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha}$$

em que

- β é o coeficiente de Angström que é uma medida da quantidade de aerossóis na atmosfera (valores entre 0.0 e 0.5). Pode ser estimado a partir da visibilidade $\beta = (0.55)^\alpha (3.912/\text{Vis} - 0.01162) [0.02472(\text{Vis} - 5) + 1.132]$

Atmosphere	β	α	Visibility (km)
Clean	0.00	1.30	340
Clear	0.10	1.30	28
Turbid	0.20	1.30	11
Very turbid	0.40	1.30	<5

Dispersão de Mie

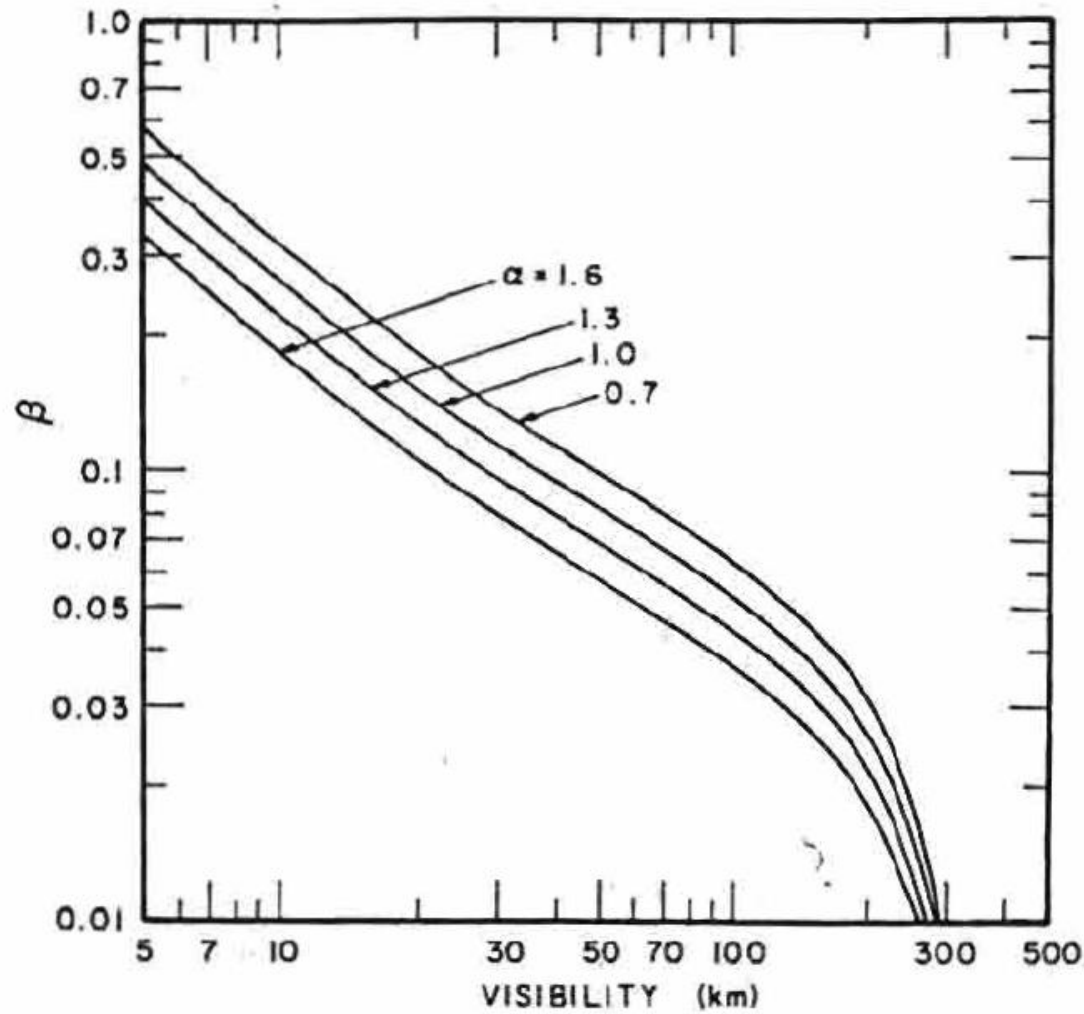
Podemos descrever todos os efeitos de equação da **turbidez**

$$k_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha}$$

em que

- ❑ β é o coeficiente de Angström que é uma medida da quantidade de aerossóis na atmosfera (valores entre 0.0 e 0.5). Pode ser estimado a partir da visibilidade $\beta = (0.55)^\alpha (3.912/\text{Vis} - 0.01162) [0.02472(\text{Vis} - 5) + 1.132]$
- ❑ α o expoente, depende da distribuição do tamanho dessas particulares, sendo maior para uma maior abundância de particular mais pequenas (valores entre 0.5 e 2.5; valor típico 1.3)

Dispersão de Mie



Radiação solar e a atmosfera

Transmitância devido à atenuação continuum (dispersão)

$$\tau_{c\lambda} = \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda} = \exp[-(k_{r\lambda} + k_{a\lambda})m] \leftarrow \text{Massa de ar (=espessura da atmosfera)}$$

Componente molecular
(Rayleigh)

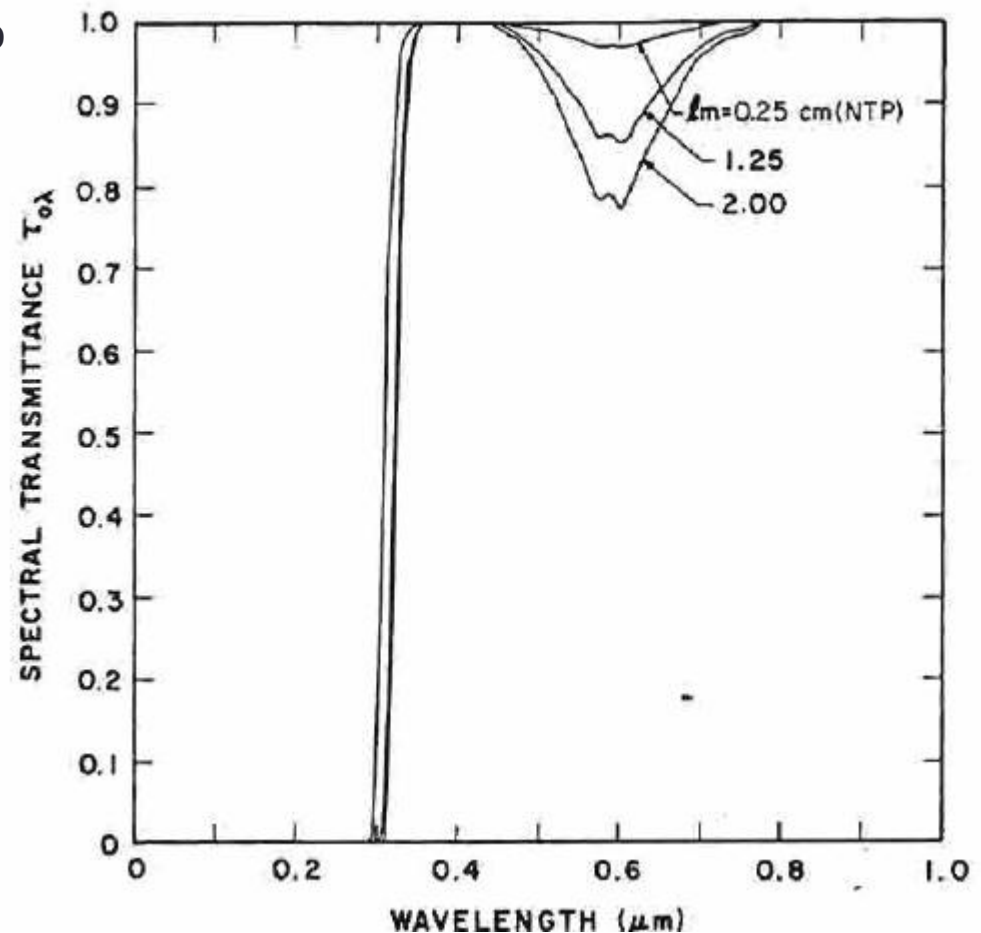
Componente aerossóis
(Mie)

Radiação solar e a atmosfera

Transmitância associada à absorção de ozono

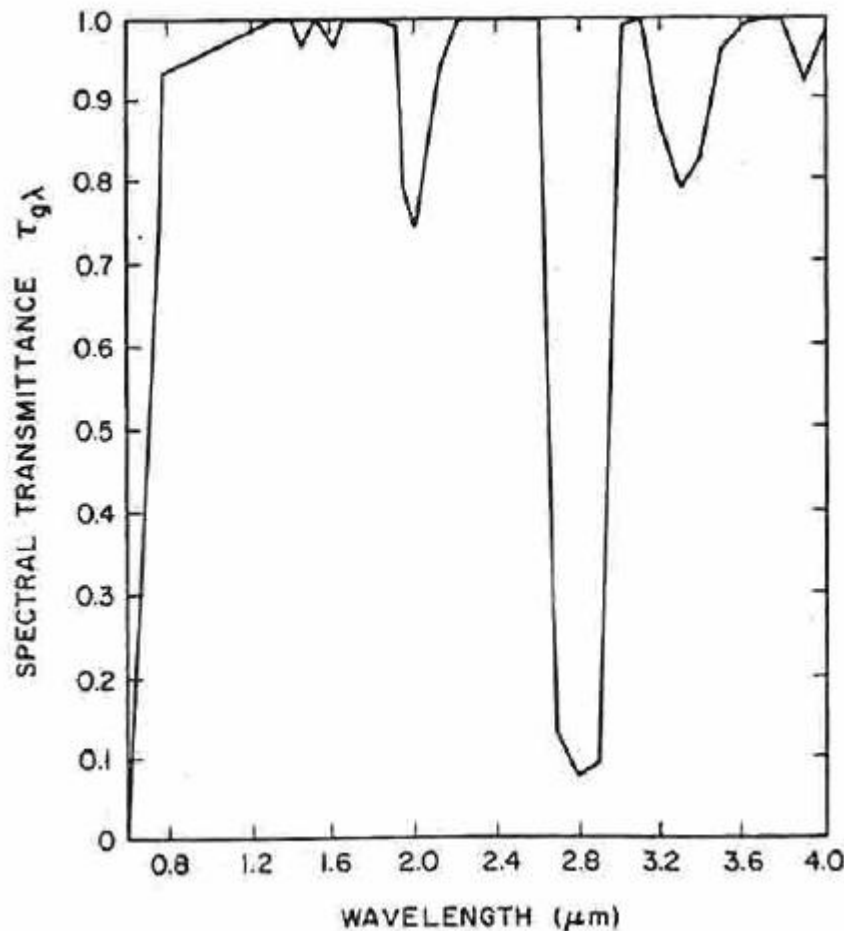
$$\tau_{0\lambda} = \exp(-k_{0\lambda} l m_r)$$

em que l é a concentração de O_3



Radiação solar e a atmosfera

$$\tau_{g\lambda} = \exp\left[-1.41k_{g\lambda}m_a/(1 + 118.93k_{g\lambda}m_a)^{0.45}\right]$$

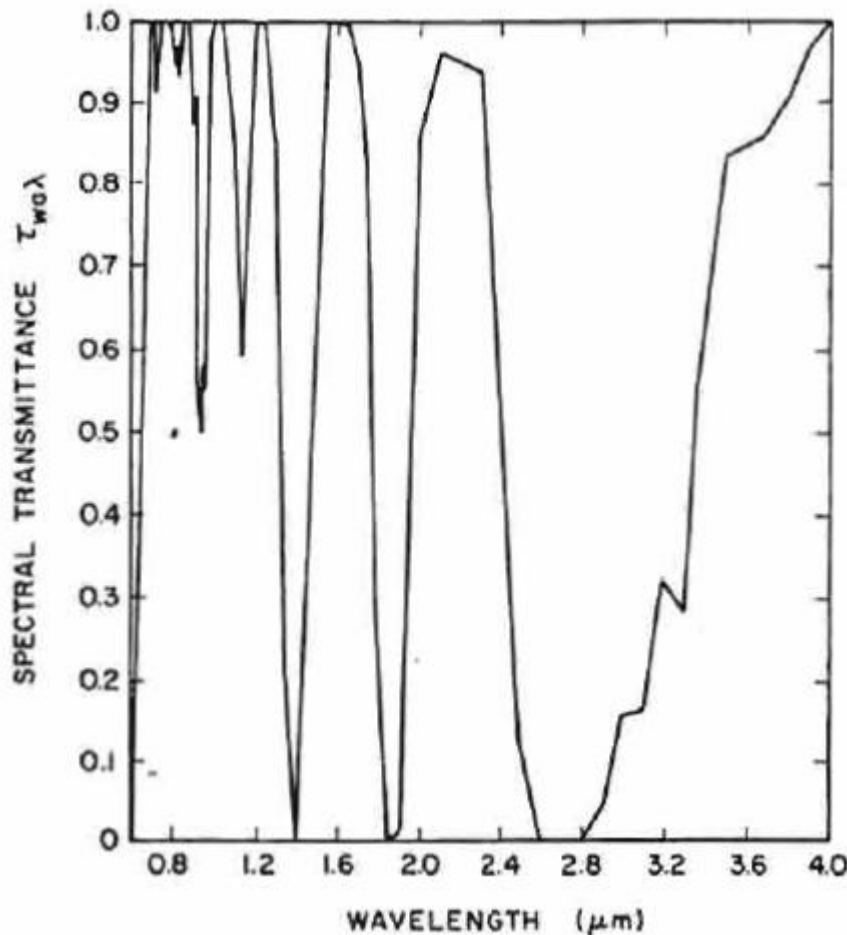


Transmitância para uma mistura molecular uniforme, incluindo CO₂ e O₂

Janela Atmosférica são as regiões em que a atmosfera é praticamente transparente à radiação solar

Radiação solar e a atmosfera

$$\tau_{wa\lambda} = \exp\left[-0.2385k_{wa\lambda}wm_r/(1 + 20.07k_{wa\lambda}wm_r)^{0.45}\right]$$



Transmitância para
absorção do vapor de água

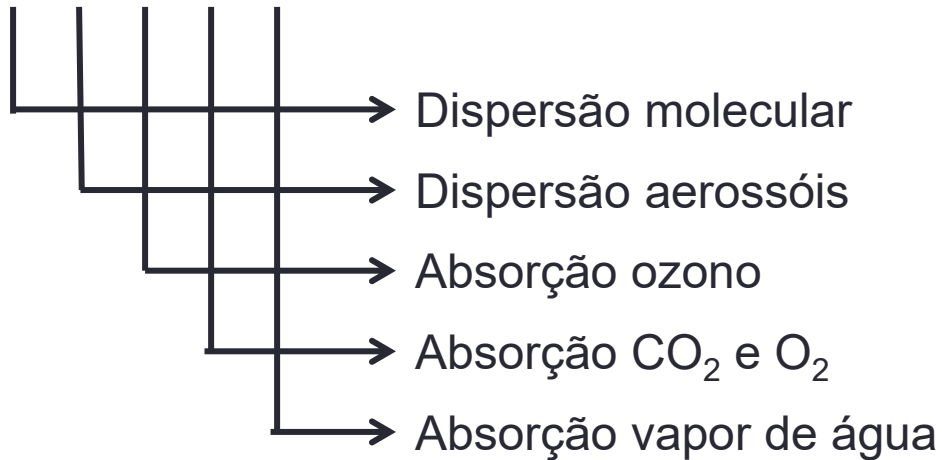
Considerando as 3
componentes, a
transmitância associada à
absorção molecular é
portanto

$$\tau_{ma\lambda} = \tau_{o\lambda}\tau_{g\lambda}\tau_{wa\lambda}$$

Radiação solar e a atmosfera

$$\tau_{\lambda} = \tau_{c\lambda} \tau_{ma\lambda}$$

$$= \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{wa\lambda}$$

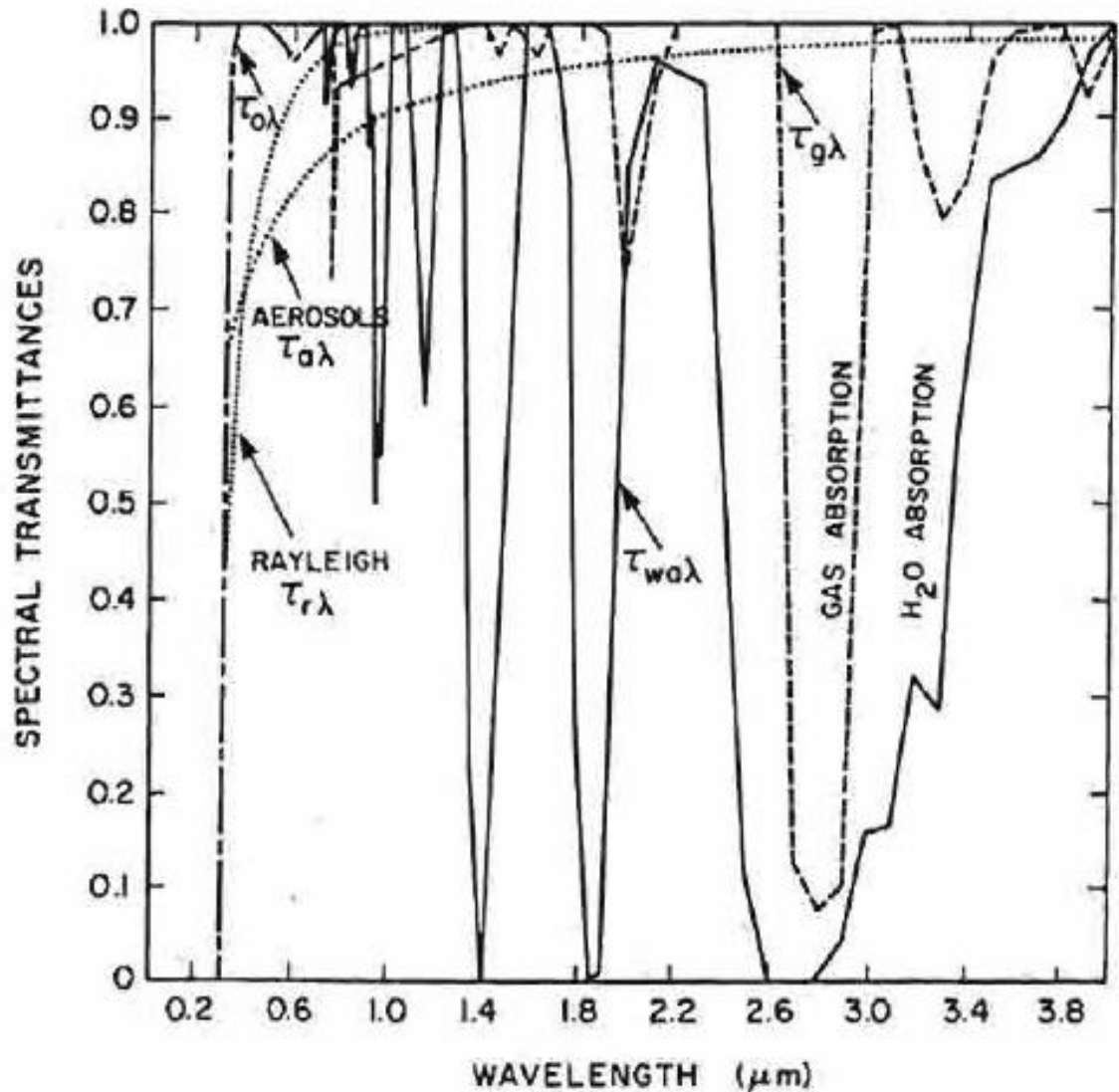


Radiação solar e a atmosfera

Absorção **infravermelho**
sobretudo **absorção**
molecular e **vapor de água**.

No **visível** a **dispersão**
molecular e por aerossóis é
dominante

No **ultravioleta**, baixa
transmitância devido a
grande **absorção do O_3**



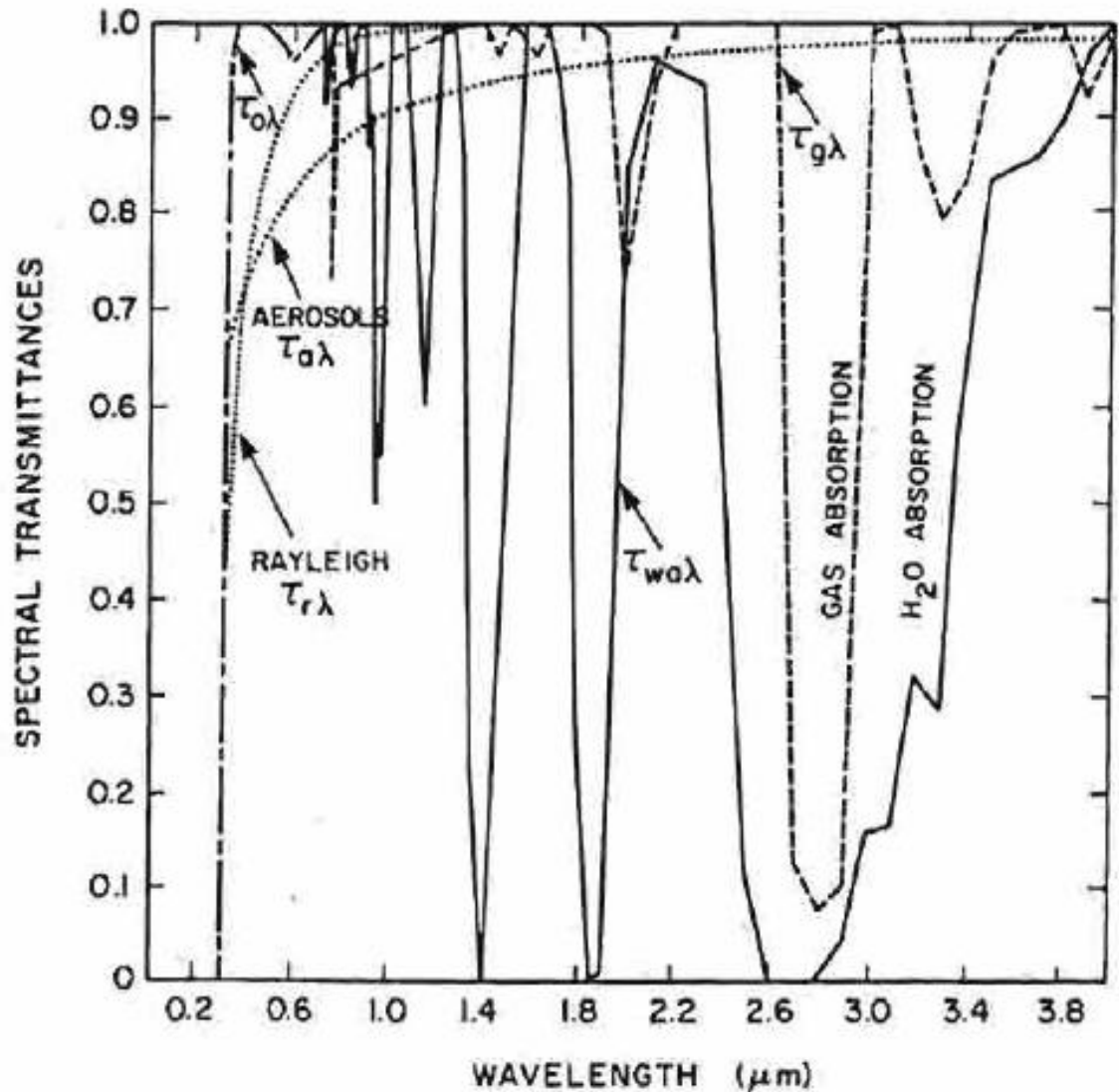
Radiação solar e a atmosfera

Para um dado comprimento de onda a radiação directa à superfície num plano normal aos raios solares é

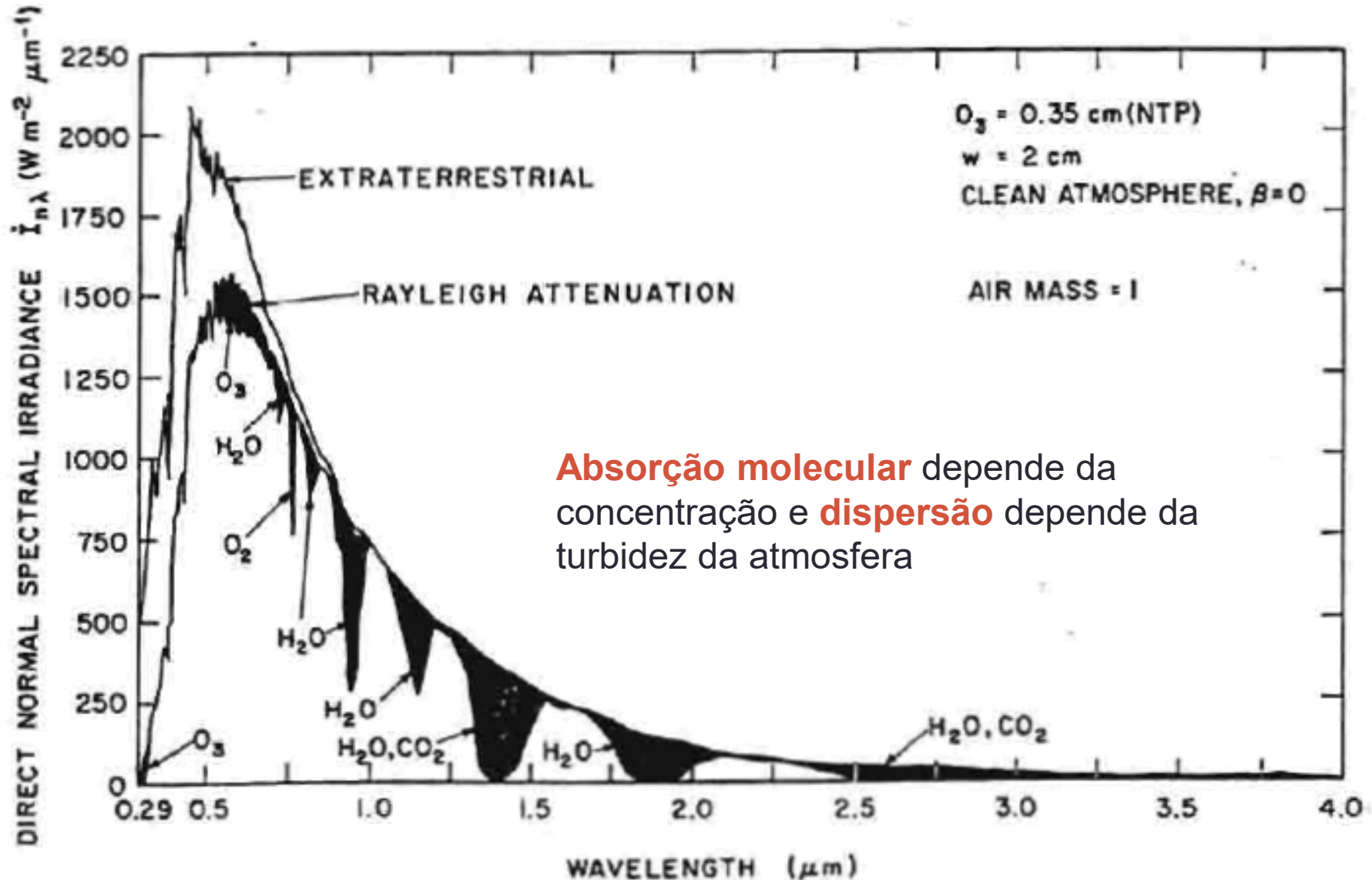
$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} \tau_{\lambda}$$

E na horizontal é

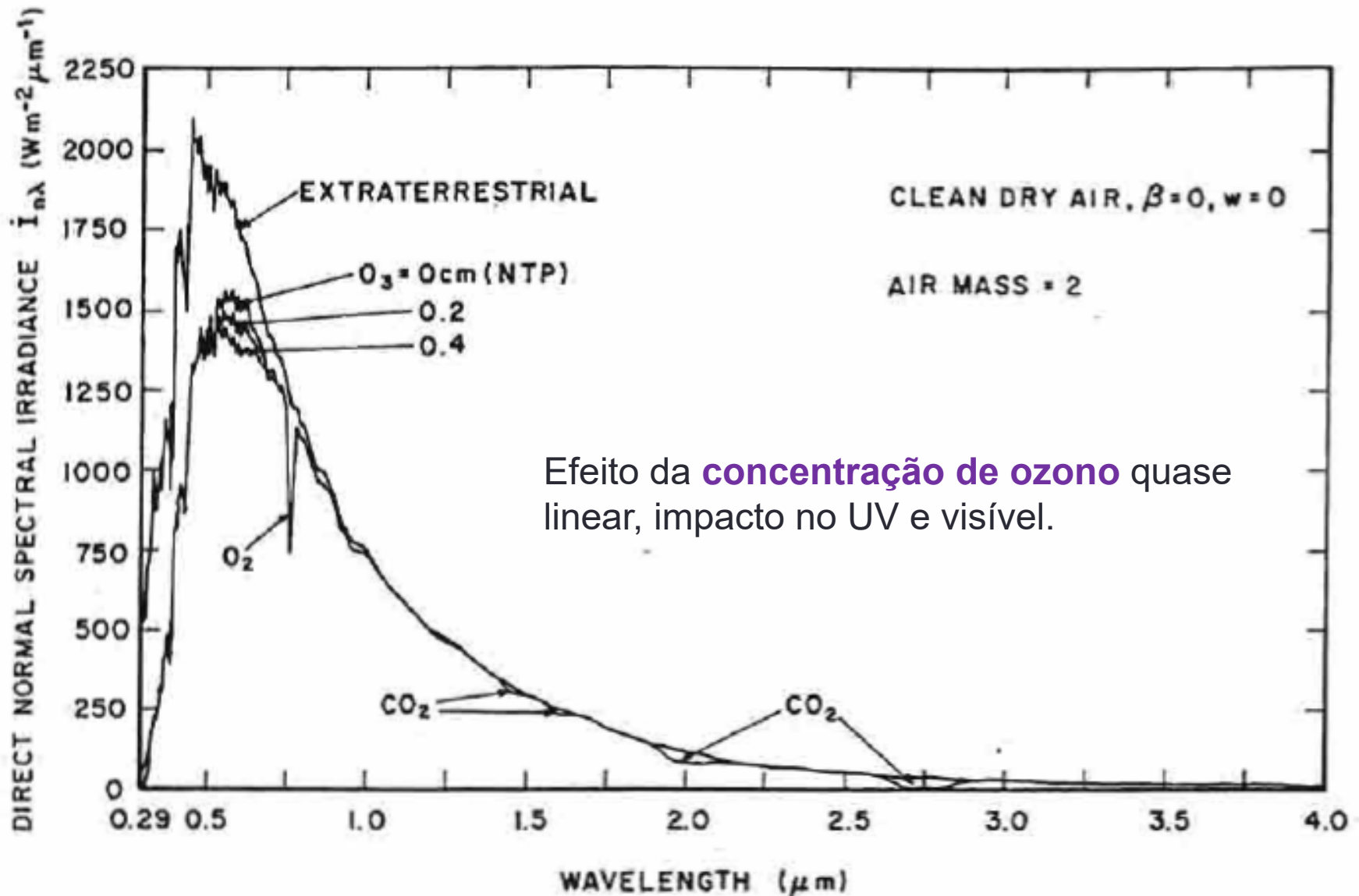
$$I_{b\lambda} = I_{0n\lambda} \cos(\theta_z) \tau_{\lambda}$$



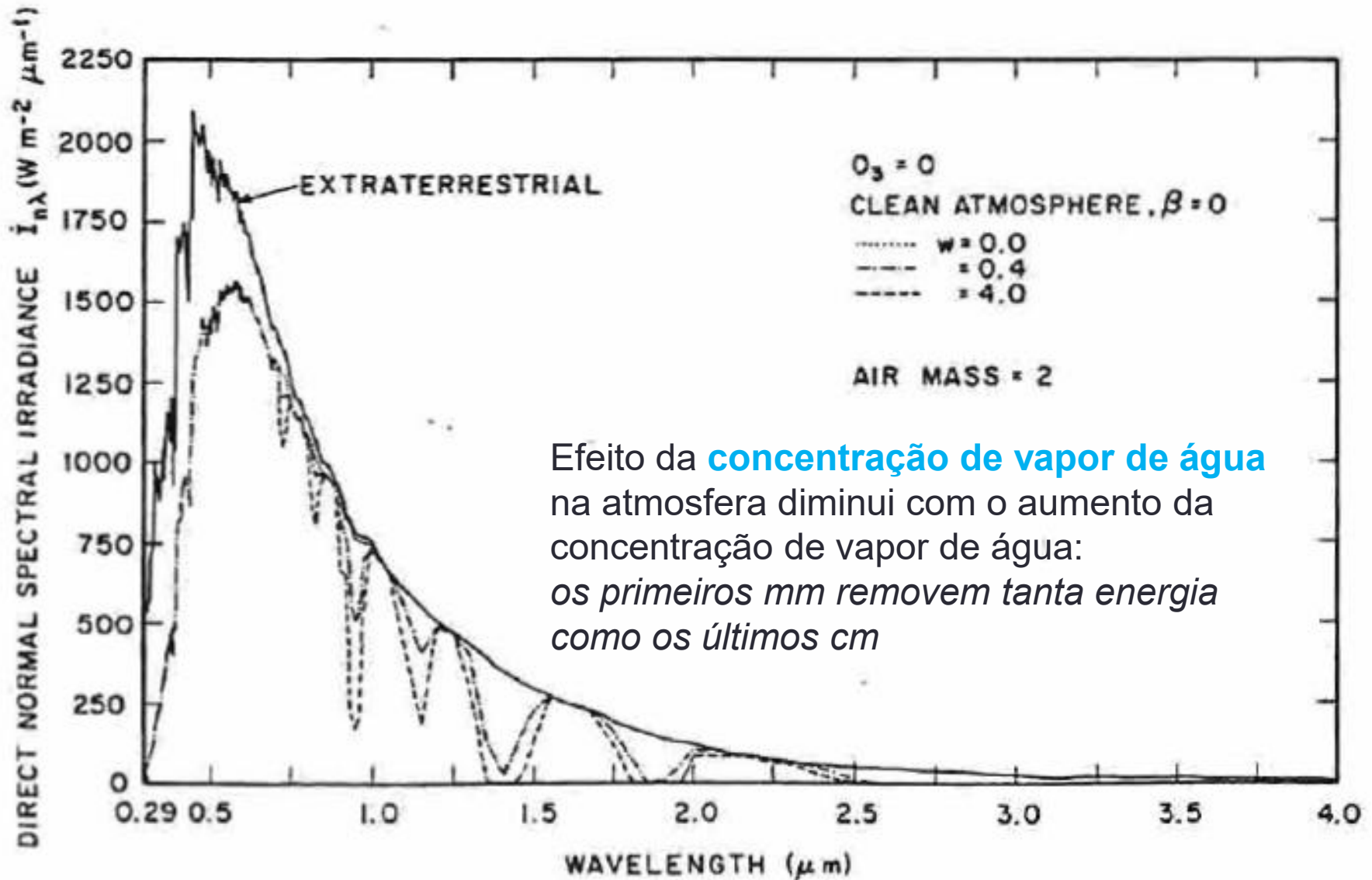
Radiação solar e a atmosfera



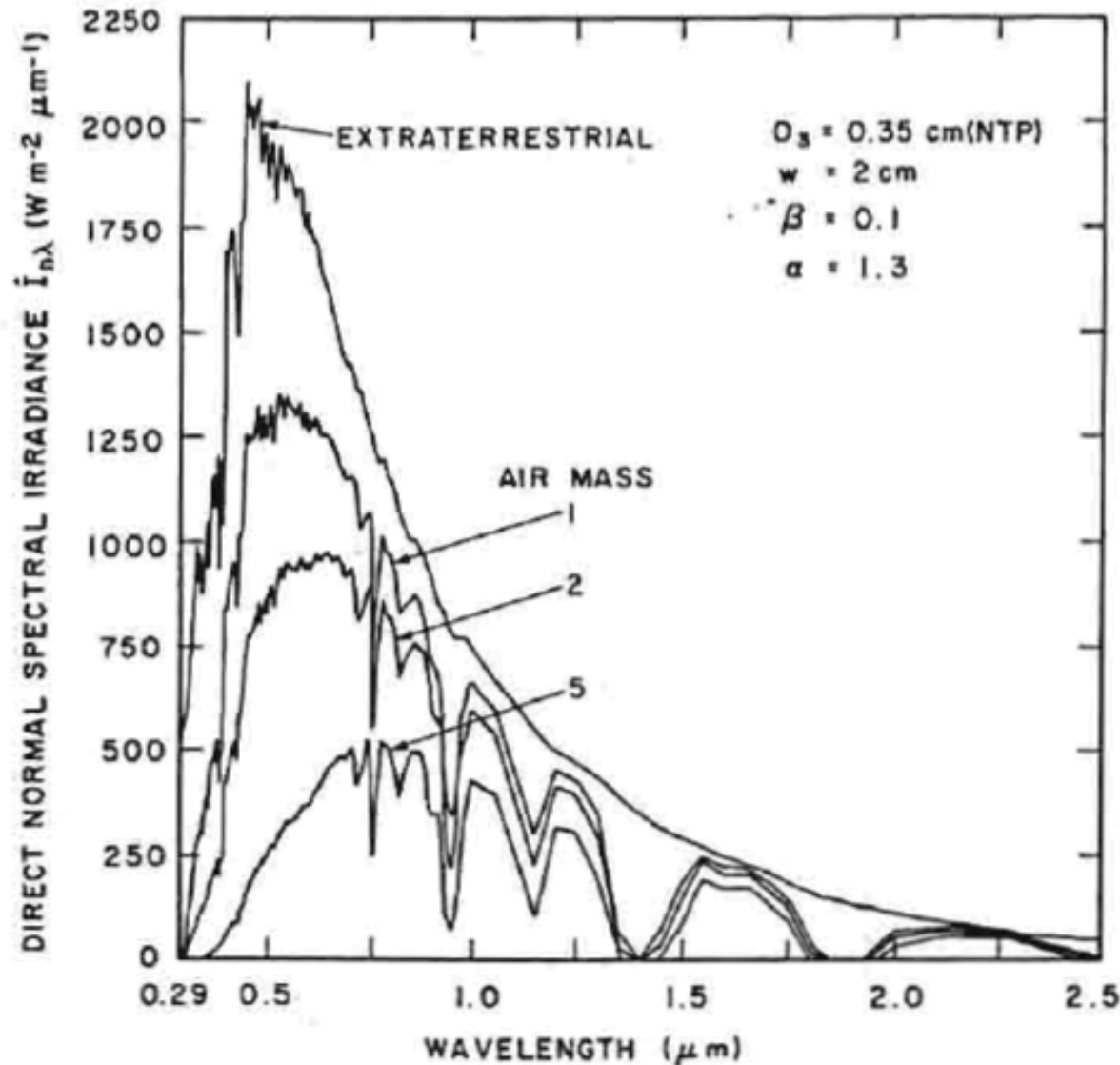
Radiação solar e a atmosfera



Radiação solar e a atmosfera



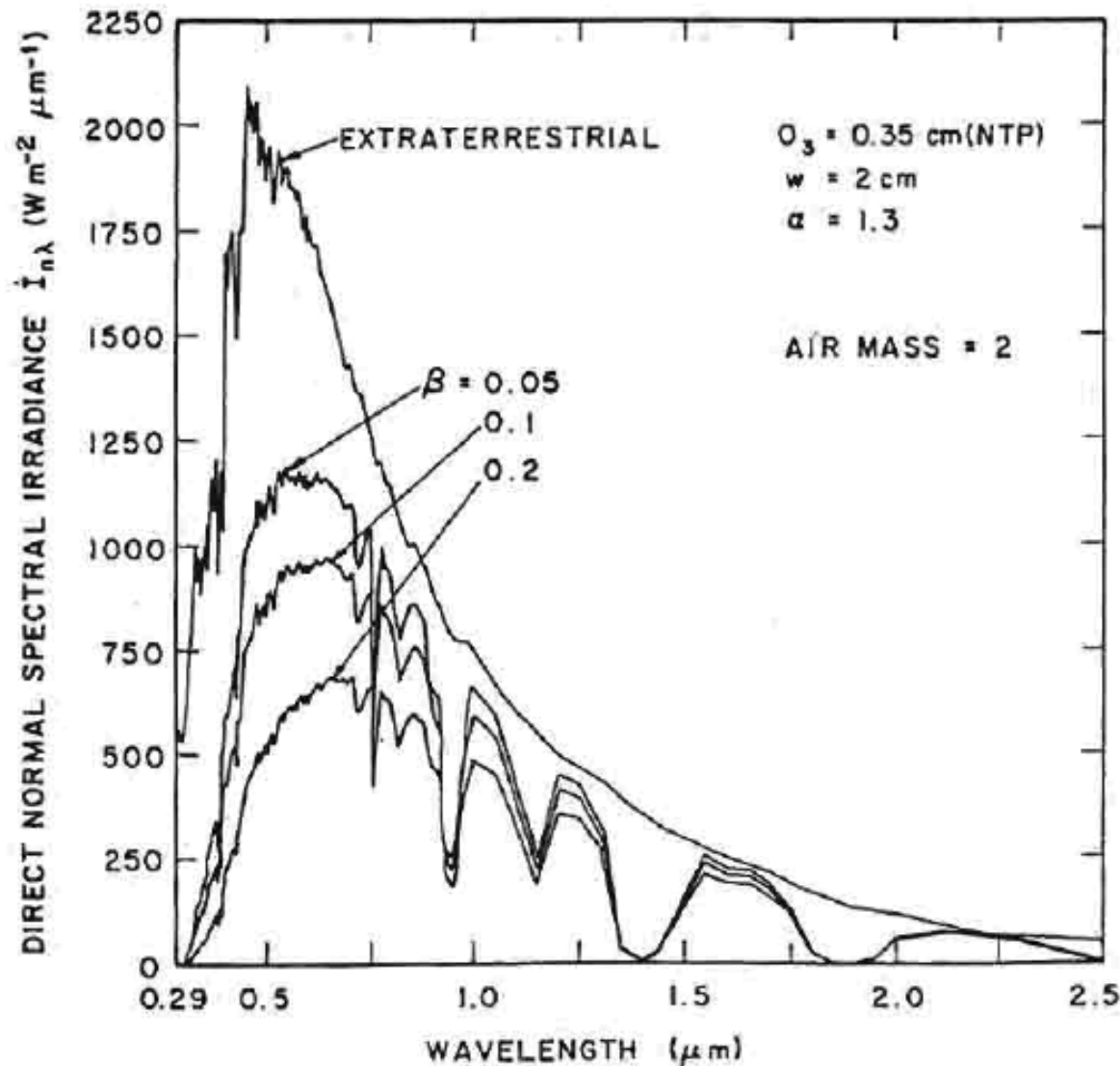
Radiação solar e a atmosfera



Efeito da **massa de ar** (espessura da atmosfera, depende do ângulo zenital) muito mais evidente no ultravioleta e visível do que infravermelho.

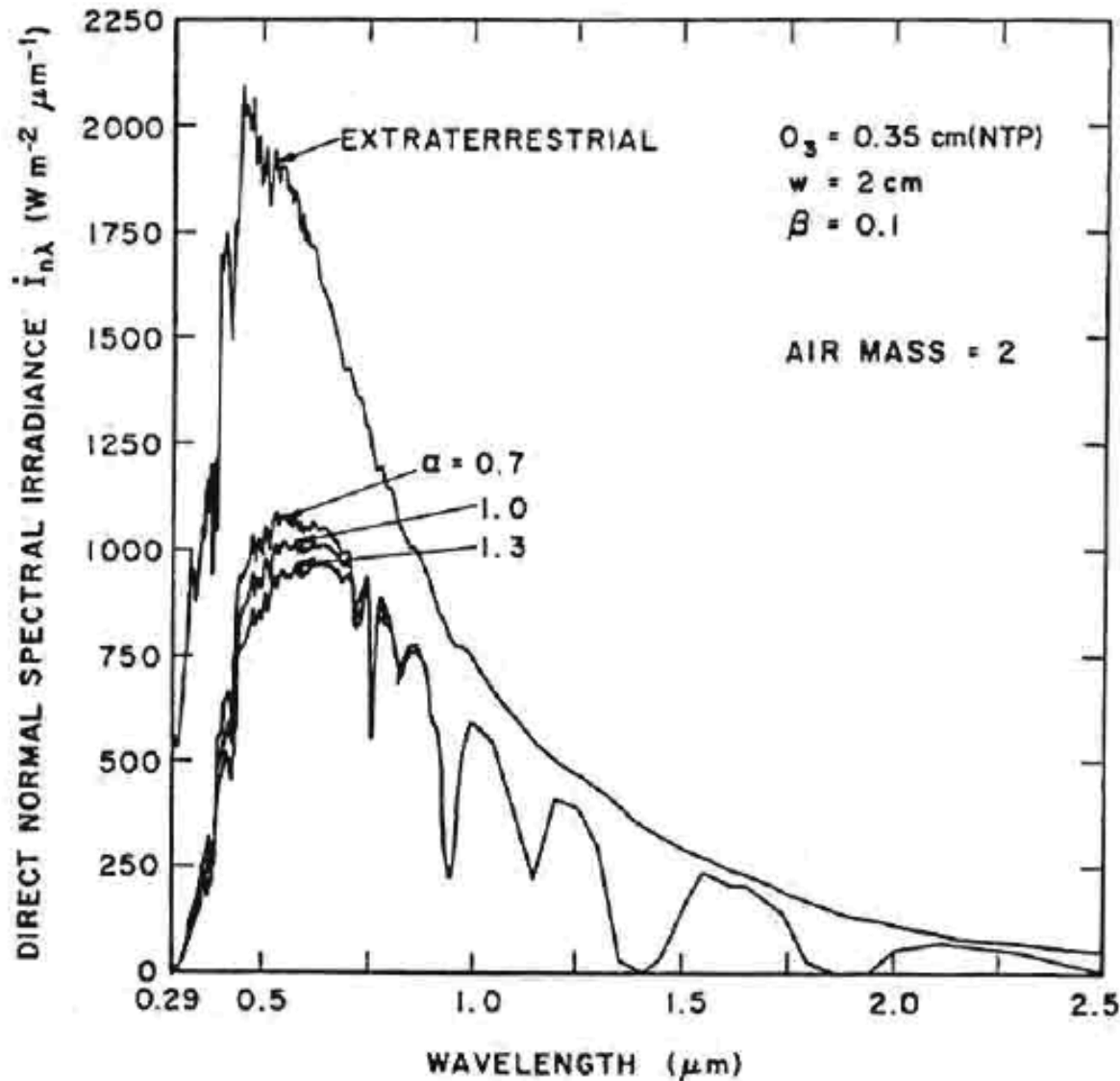
(por isso é que o pôr do sol é vermelho!)

Radiação solar e a atmosfera



Efeito da **turbidez**
(densidade de aerossóis)
particularmente relevante
na alteração do espectro
solar à superfície, em
particular no visível.

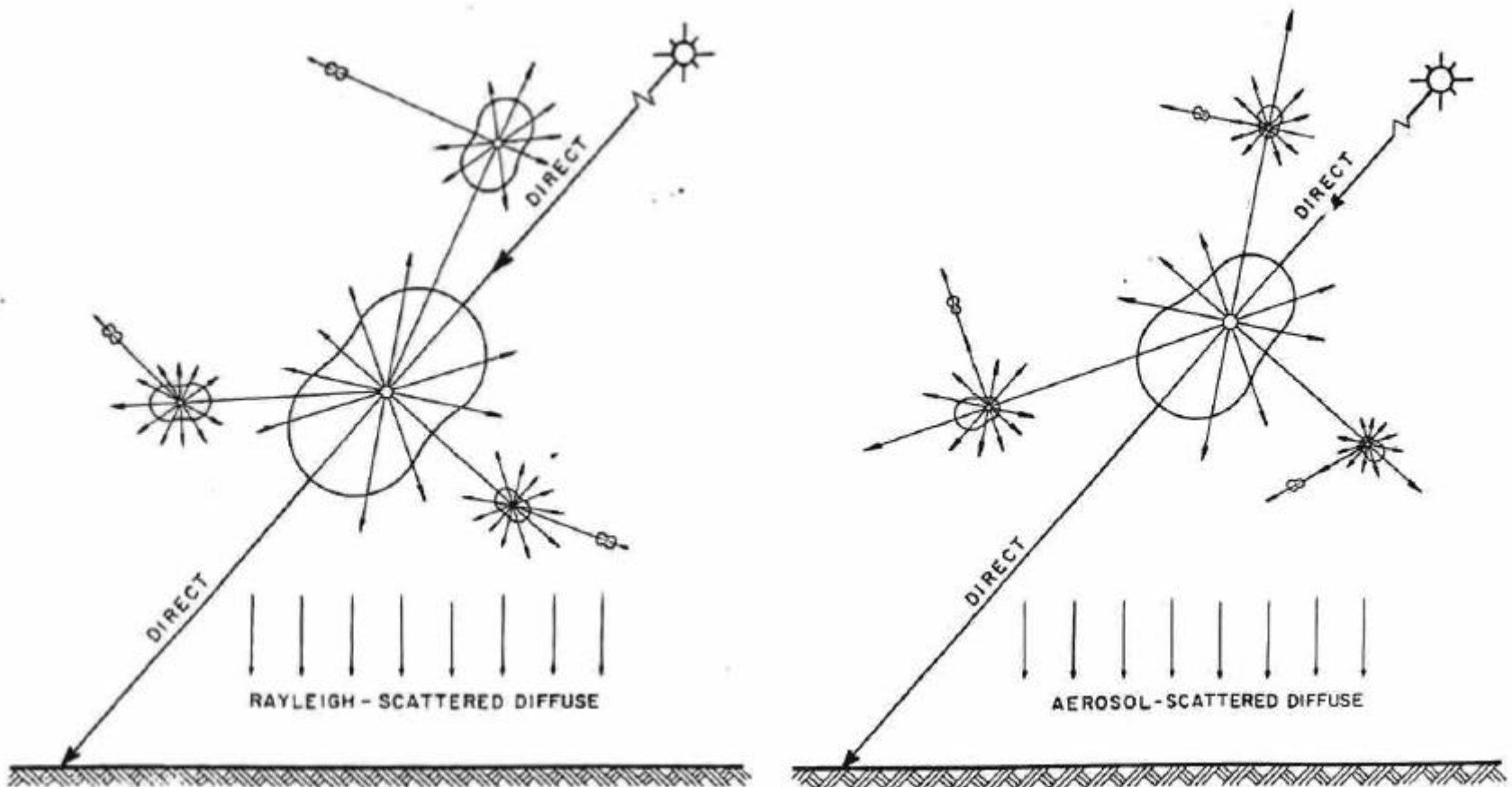
Radiação solar e a atmosfera



Efeito do **expoente α**
(dimensão dos aerossóis)
é pouco importante, sendo
mesmo indistinguível a
partir de $1\mu\text{m}$.

Radiação solar e a atmosfera

E o espectro da radiação solar difusa, como é?



Radiação solar e a atmosfera

Atmosfera de Rayleigh

Por unidade de energia incidente,
a radiação difusa é

$$1 - \tau_{r\lambda}$$

que também vai atravessar a
atmosfera e ser atenuada.

Radiação solar e a atmosfera

Atmosfera de Rayleigh

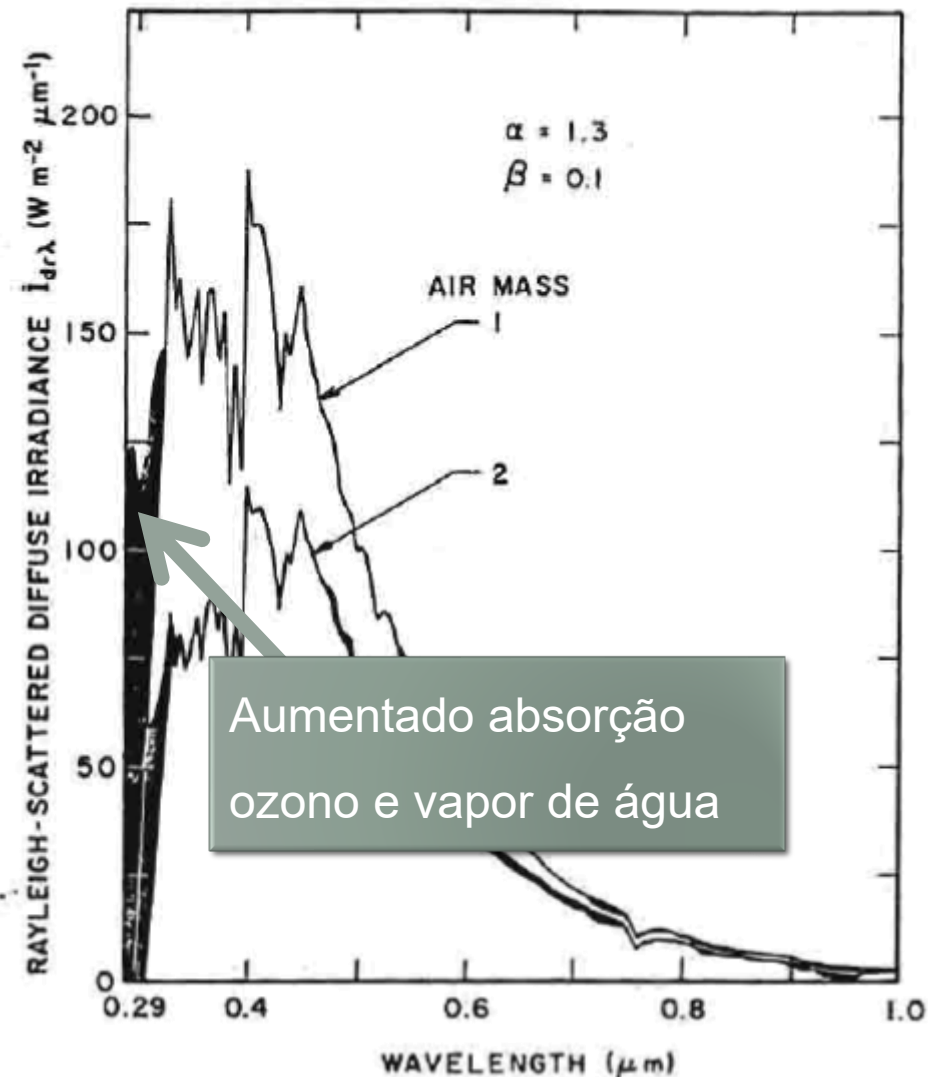
Por unidade de energia incidente,
a radiação difusa é

$$1 - \tau_{r\lambda}$$

que também vai atravessar a
atmosfera e ser atenuada.

Assumindo que $\frac{1}{2}$ da dispersão
perde-se para cima!

$$I_{dr\lambda} = I_{0n\lambda} \cos(\theta_z) \tau_{ma\lambda} [0.5(1 - \tau_{r\lambda}) \tau_{a\lambda}]$$



Radiação solar e a atmosfera

Atmosfera de aerossóis

temos duas componentes (absorção e dispersão)

$$1 - \tau_{a\lambda} = 1 - \tau_{aa\lambda} \tau_{as\lambda}$$

que pode ser reescrito usando o ratio da energia perdida por dispersão a dividir pela atenuação total

$$\omega_0(1 - \tau_{a\lambda})$$

Valores típicos para ω_0 entre 0.6 (poluição urbana) e 0.9 (meio rural), invariante com o comprimento de onda

Radiação solar e a atmosfera

Atmosfera de aerossóis

temos duas componentes (absorção e dispersão)

$$1 - \tau_{a\lambda} = 1 - \tau_{aa\lambda} \tau_{as\lambda}$$

que pode ser reescrito usando o ratio da energia perdida por dispersão a dividir pela atenuação total

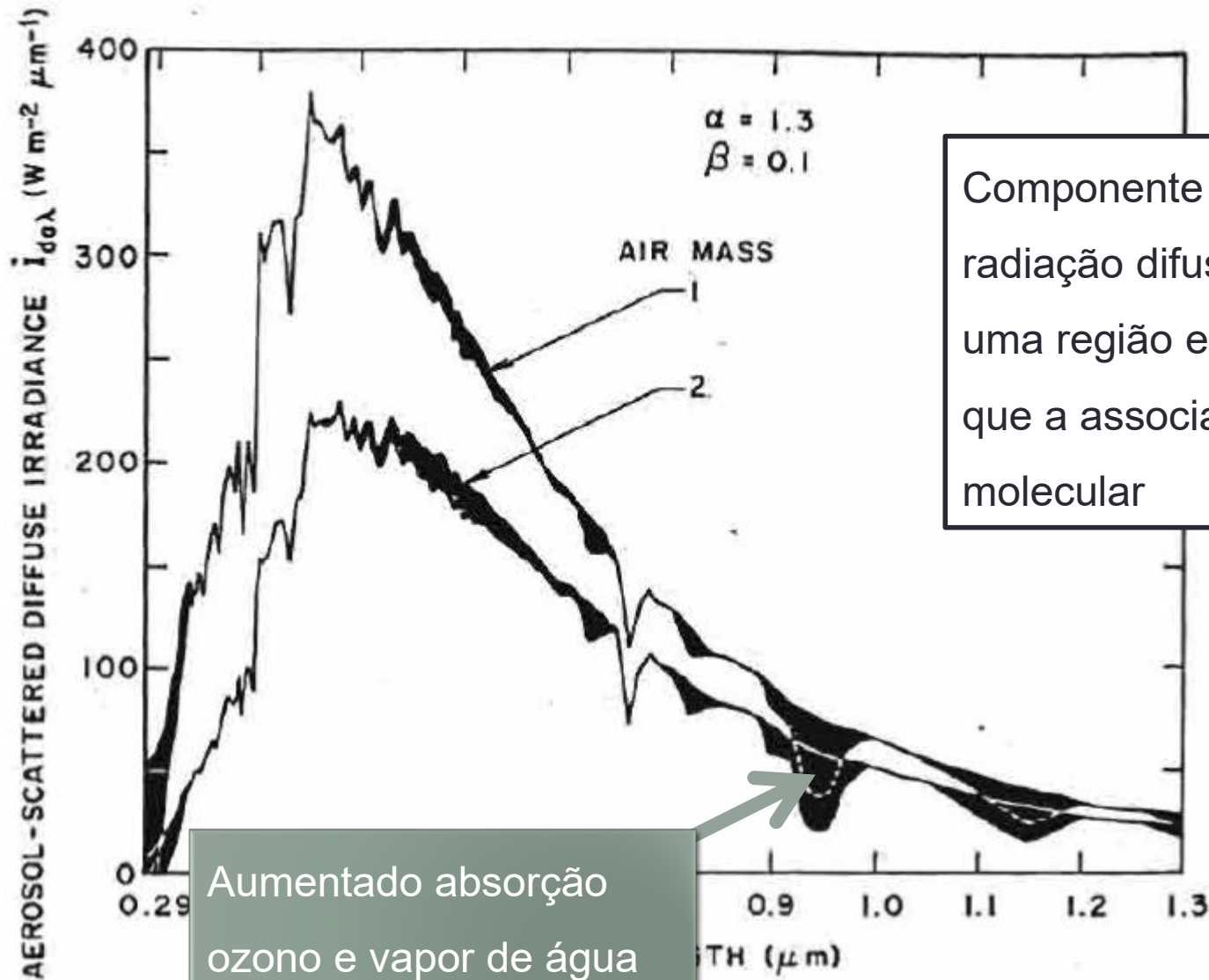
$$\omega_0(1 - \tau_{a\lambda})$$

E portanto a radiação difusa associada aos aerossóis é

$$I_{da\lambda} = I_{0n\lambda} \cos(\theta_z) \tau_{ma\lambda} [F_c \omega_0 (1 - \tau_{a\lambda}) \tau_{r\lambda}]$$

Ao contrário da dispersão molecular, o *forward scattering* é mais provável do que o *backscattering*, mas muito dependente do tipo e densidade de aerossóis presentes

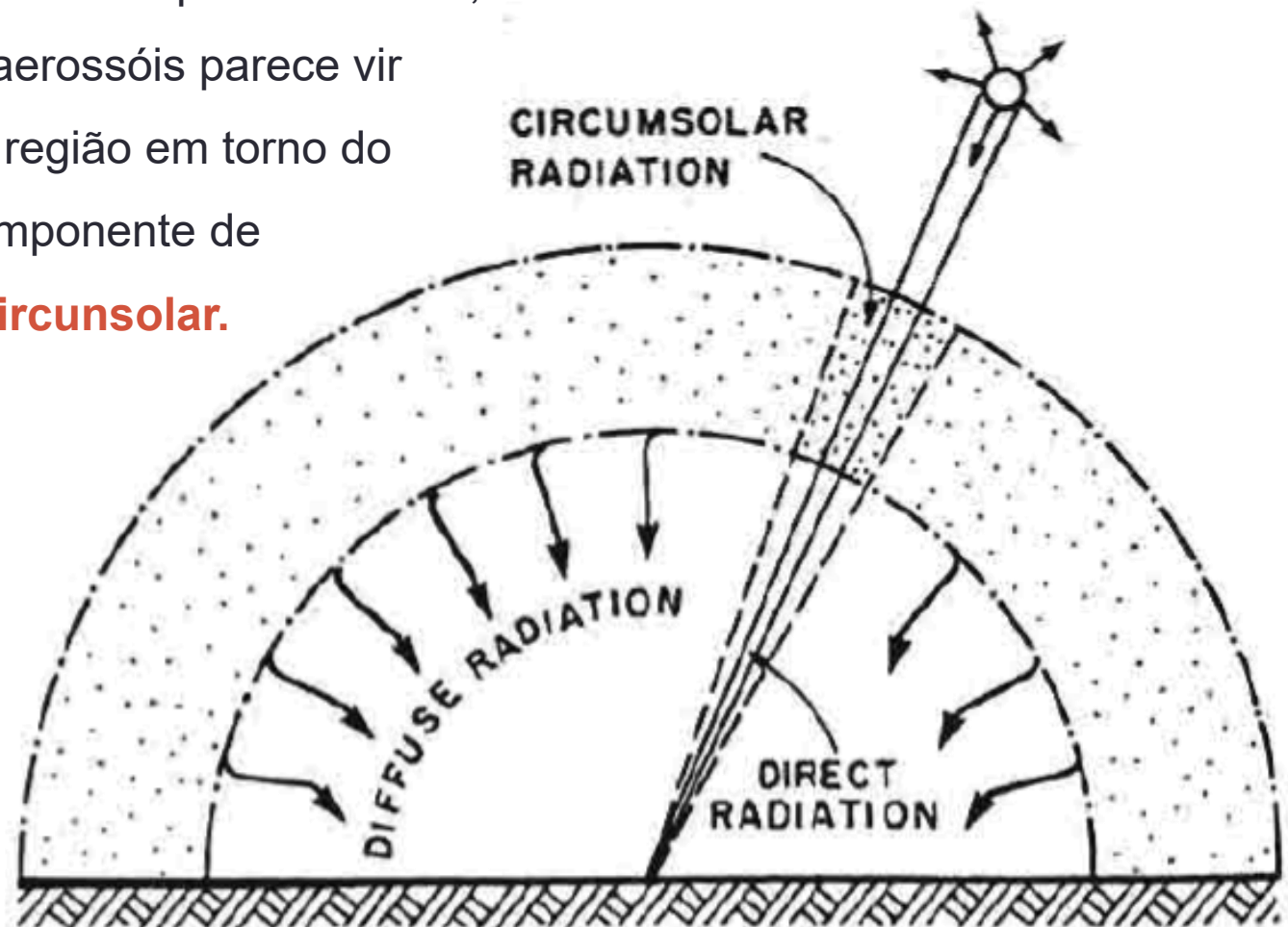
Radiação solar e a atmosfera



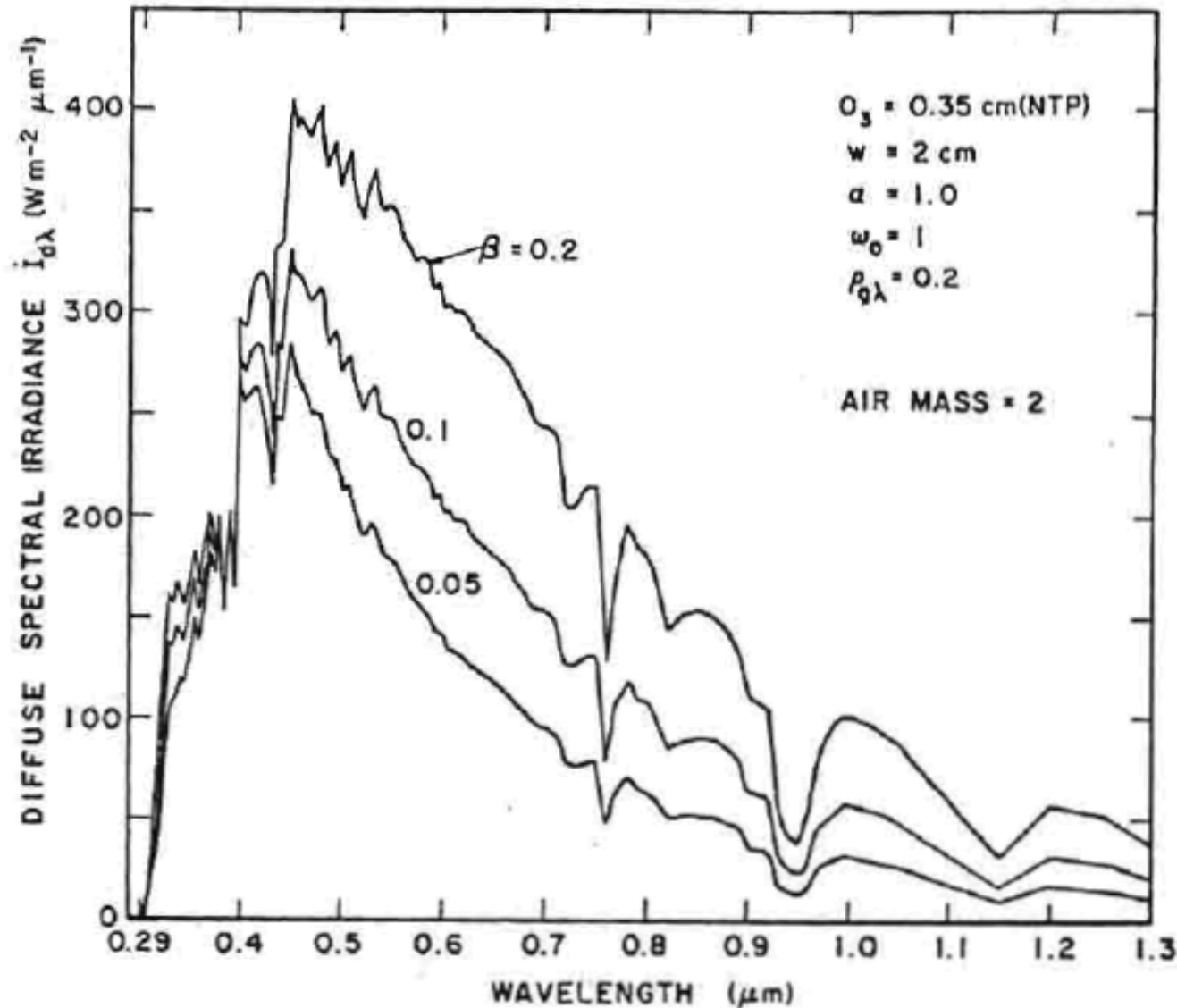
Componente de aerossóis da radiação difusa estende-se a uma região espectral maior do que a associada à dispersão molecular

Radiação solar e a atmosfera

Devido à anisotropia de dispersão de Mie, a componente de aerossóis parece vir sobretudo de uma região em torno do disco solar; é a componente de **radiação difusa circunsolar.**



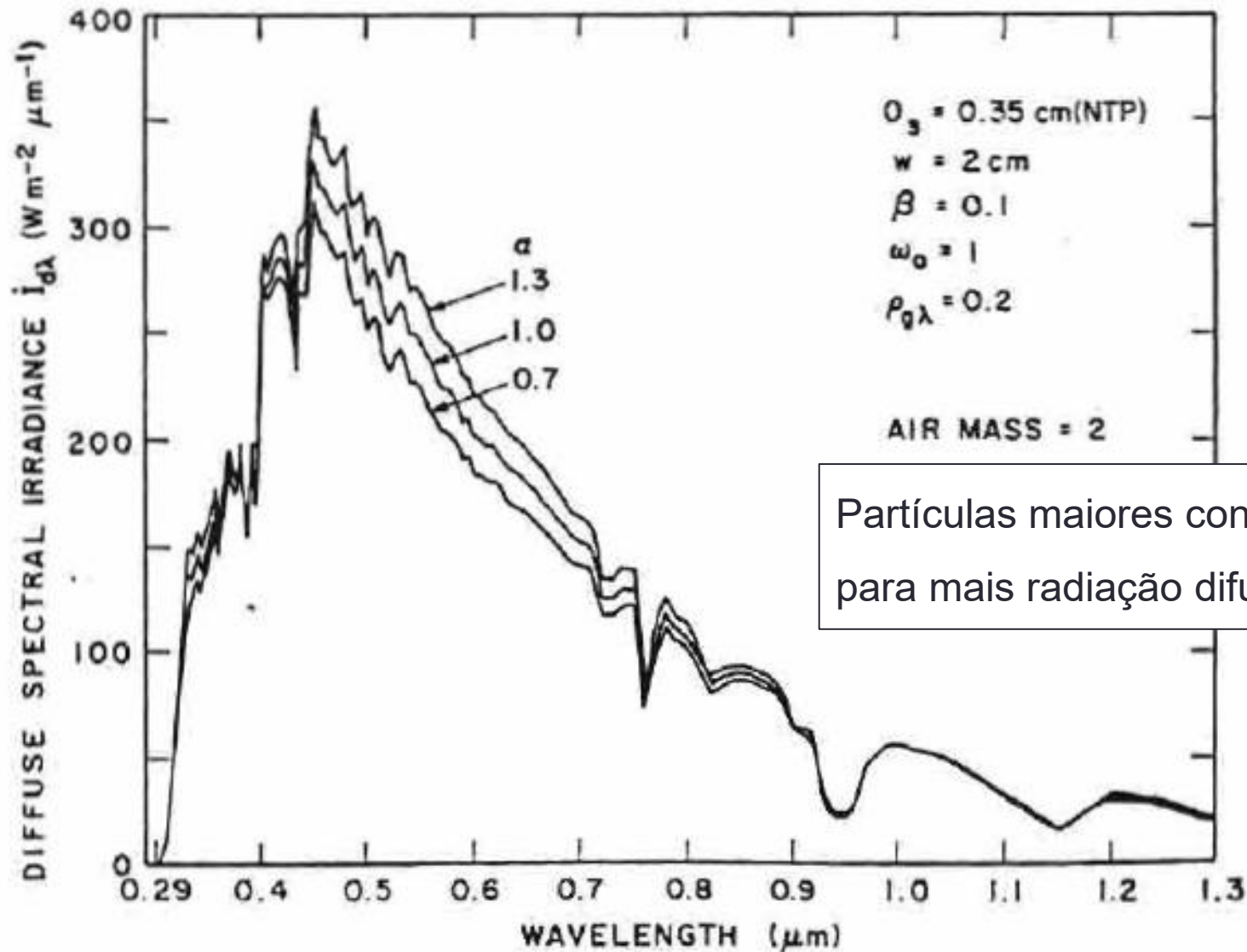
Radiação solar e a atmosfera



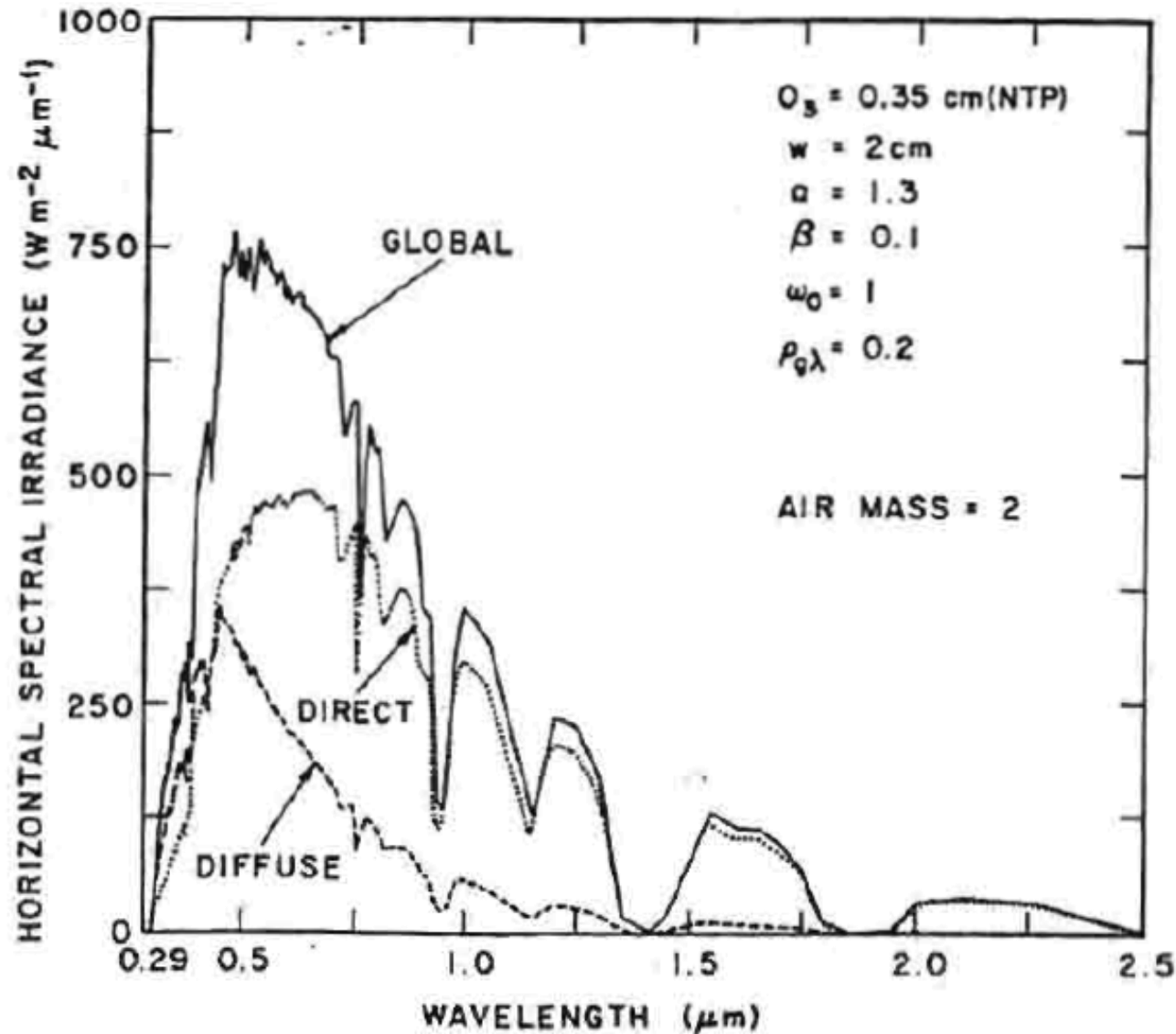
Efeito da
turbidez.

Quanto maior a
densidade de
aerossóis, maior a
componente de
radiação difusa

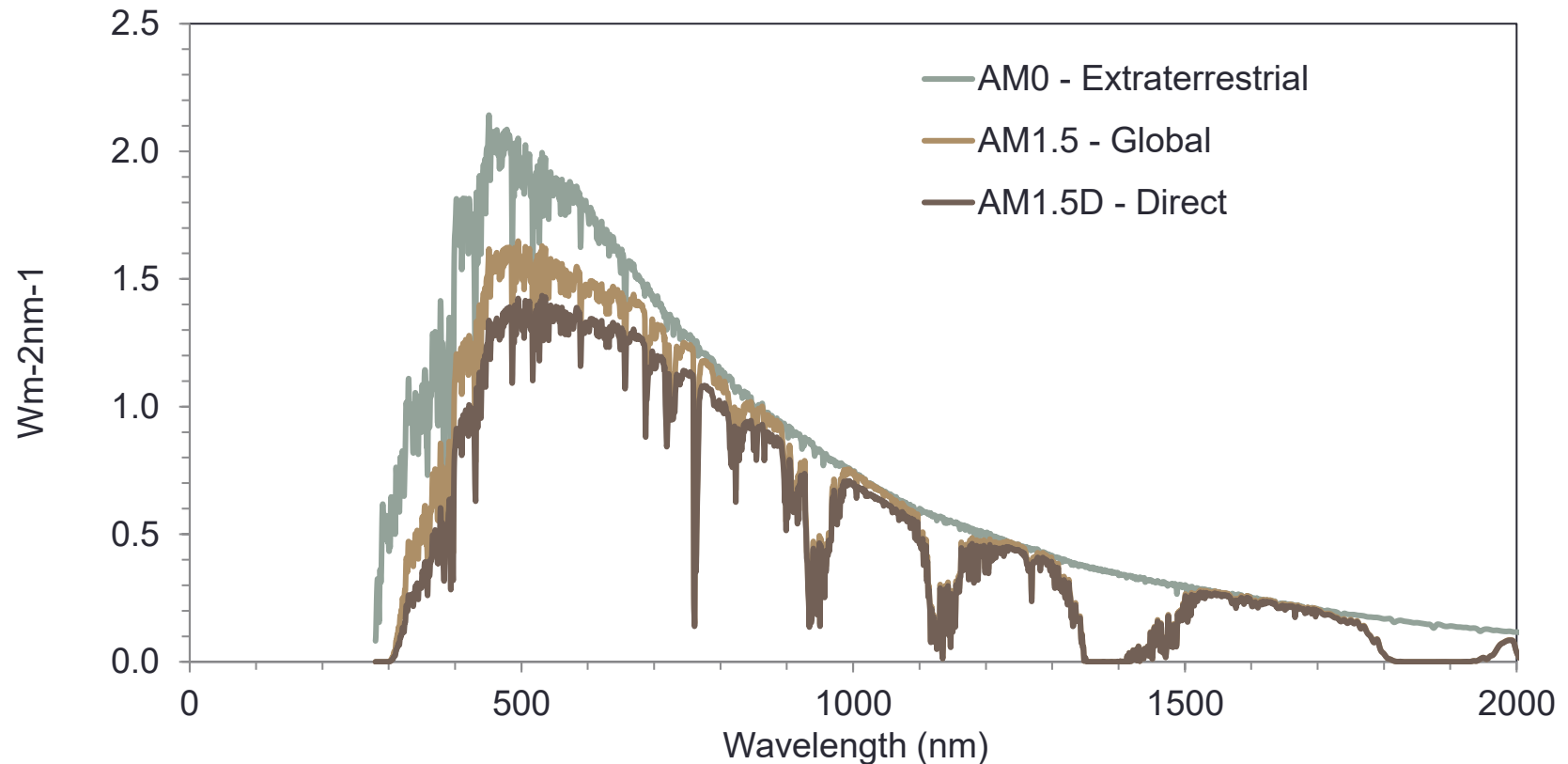
Radiação solar e a atmosfera



Radiação solar e a atmosfera



Radiação solar e a atmosfera



AM0 – **1366 W/m^2** (ASTM E-490)

AM1.5 Global – **1000 W/m^2** (ASTM G-173-03 (International standard ISO 9845-1, 1992)

AM1.5D – **900 W/m^2** (inclui circumsolar com disco de 2.5°)